

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Tração Elétrica Ferroviária Baseada em Baterias - Última Milha

José Manuel Gomes Ferreira Queirós



Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor António Pina Martins

16 de Julho de 2017

Resumo

Com o crescimento de preocupações ambientalistas a nível mundial, é cada vez mais necessário recorrer a formas de energia diferentes dos combustíveis fósseis cuja utilização tem sido dominante. Com limitações de áreas protegidas a nível paisagístico, é necessário fazer chegar a energia sem o recurso às grandes infraestruturas. Tais restrições estão também presentes no mundo ferroviário, com a limitação da presença da linha catenária em grandes centros urbanos, impedindo os comboios de chegarem ao seu destino final, mais próximo dos consumidores. Assim, surge a necessidade de desenvolver um sistema de baterias capaz de fornecer energia elétrica aos motores de forma autónoma durante este trecho do percurso, a última milha.

Uma solução para este problema passa pela elaboração de uma ESS (*Energy Storage System*), sistema que engloba um dispositivo de armazenamento e um conversor DC/DC de forma a conectar com a zona de tração do comboio.

Este documento apresenta uma revisão bibliográfica sobre o programa de engenharia no qual ele se insere, uma revisão sobre a condicionante da ausência de linha catenária e também os sistemas de fornecimento de energia elétrica que a bateria irá substituir. Será dada uma maior atenção à revisão das tecnologias de armazenamento capazes de suportar um sistema de grandes dimensões energéticas e também às topologias de conversão DC/DC.

Foi projetada uma ESS global, desde o dispositivo de armazenamento até ao barramento DC da zona de tração do comboio. Tendo em vista a realização do dispositivo, bem como, o seu dimensionamento foi selecionada uma tecnologia. De forma a obter os valores pretendidos na zona de tração, o projeto do conversor DC/DC contemplou, não apenas, o dimensionamento dos seus elementos especificados, mas ainda, alterações na forma como a tensão é inserida no conversor.

Abstract

The growing concern regarding the environment, compelled the human being to find new ways of producing energy without the fossil resources. In addition, the boundaries imposed by the protected areas, obliged the transportation of energy without the use of large infrastructures. Regarding the railway industry, we can draw a parallelism with this new reality. The limited presence of catenary line in big urban centers, that restrains trains in order to get to their final destination, that being, closer to the consumers. Thereby, the need to develop a system that enables batteries to supply electrical energy to the engines, in an autonomous way, during the final stretch of the ride, more accurately, during the last mile.

The solution for this problem is to elaborate a ESS system, which comprises a storage unit, and a DC/DC converter, to connect it with the DC-bus.

This document includes a bibliographic review about the engineering program relative to this topic, a review about the limitations of the absence of the catenary line, and lastly, the role of the battery as the power supplier. There will be a careful analysis of the different approaches and technologies to store energy in important quantities and topologies regarding DC/DC conversion.

This project develops an ESS global, from the storage unit to the DC-bus. Furthermore, the selected technology for the device and the respective dimensioning is described in this document. In order to obtain the values expected in the bus, the DC/DC converter was conceived not only dimensioning each element specified, but also change the way as the voltage is introduced to the converter.

Agradecimentos

Aqui fica o meu reconhecimento a todos aqueles que estiveram ao meu lado durante o meu curso.

Um obrigado a toda a minha família, por me ter possibilitado a realização do curso, por sempre me apoiarem e acreditarem em mim, por sempre me carregarem neste percurso. Um obrigado especial a quem me viu iniciar este curso e sempre me apoiou, mas infelizmente não me poderá assistir a finaliza-lo.

Um obrigado a todos os que tornaram a minha vida mais complicada aqui na faculdade, que me fizeram crescer, que me fizeram lutar, correr, saltar, e que lutaram comigo ao meu lado. Aqueles que me fizeram sorrir e que eu espero ter feito sorrir, aqueles que vivi todos os cenários possíveis, cenários de deitar as mãos à cabeça, uma palavra de apreço.

José Queirós

“I have not failed. I’ve just found 10,000 ways that won’t work.”

Thomas A. Edison

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Definição do problema	1
1.3	Objetivos	1
1.4	Motivação	2
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Introdução	3
2.2	Programa Shift2Rail	4
2.2.1	<i>IP1: Cost-efficient and reliable trains, including high capacity trains and high speed trains</i>	4
2.2.2	<i>IP3: Cost Efficient and Reliable High Capacity Infrastructure</i>	4
2.2.3	<i>IP5: Technologies for Sustainable and Attractive European Rail Freight</i>	5
2.3	Ausência da Catenária	5
2.4	Sistemas de fornecimento de potência das linhas ferroviárias elétricas	5
2.4.1	Linhas 25kV AC 50Hz	6
2.4.2	Linhas 15 kV AC 16 2/3 Hz	8
2.4.3	Linhas DC	10
2.5	Dispositivo de armazenamento de energia	12
2.5.1	<i>Condensadores eletroquímicos de dupla camada (EDLC)</i>	12
2.5.2	<i>Flywheels</i>	13
2.5.3	<i>Baterias</i>	13
2.6	Conversor DC/DC	16
2.6.1	Circuito principal	17
2.6.2	Controlador	18
2.7	Conclusão	19
3	Dispositivo de armazenamento (bateria)	21
3.1	Introdução	21
3.2	Vista geral de tecnologias	21
3.3	Baterias de ácido chumbo	23
3.4	Células de combustível	24
3.5	Especificação do dispositivo de armazenamento	26
3.5.1	Dimensionamento	26
3.6	Conclusão	28

4	Conversor DC/DC	29
4.1	Introdução	29
4.2	Primeira emulação e resultados	29
4.2.1	Circuito de potência	29
4.2.2	Circuito de controlo	33
4.3	Segunda emulação e resultados	38
4.4	Terceira emulação e resultados	43
4.5	Perdas de potência nos IGBT's	44
4.6	Conclusão	48
5	Conclusões e Trabalho Futuro	49
5.1	Conclusões	49
5.2	Trabalho Futuro	50
	Referências	51

Lista de Figuras

2.1	Diagrama base de uma ESS	3
2.2	Diagrama sistema 1*25 kV [1]	6
2.3	Diagrama sistema 2*25 kV [1]	7
2.4	Utilização de auto-transformador no TPS [1]	7
2.5	Interface da linha de 15 kV 16.7 Hz com rede exterior[1]	8
2.6	Diagrama de conversor rotativo [2]	9
2.7	Diagram geral TPS 15 kV [1]	10
2.8	Interface das linhas DC com a rede [1]	11
2.9	Diagrama sistema tração linha 3 kV DC [1]	11
2.10	Sistema flywheel [3]	13
2.11	Funcionamento base baterias [4]	14
2.12	Circuito de potência conversor DC/DC [5]	17
2.13	Diagrama controlo conversor DC/DC	18
3.1	Funcionamento célula de combustível [6]	24
3.2	Produção de eletricidade numa célula de combustível	25
3.3	Performance célula de combustível. Curva I vs V [6]	26
4.1	Circuito de potência do conversor DC/DC	30
4.2	Tensão nas bobinas	31
4.3	Corrente dos três conversores elementares	31
4.4	Corrente proveniente da bateria	32
4.5	Corrente à saída do conversor	32
4.6	Tensão à saída conversor, nível do barramento DC	32
4.7	Circuito controlador do conversor	33
4.8	Controlador tensão	33
4.9	Controlador de corrente 1	34
4.10	Controlador de corrente 2	34
4.11	<i>Duty Cycle</i>	35
4.12	Sinais de comutação dos três IGBT's	35
4.13	Circuito de potência da segunda emulação	38
4.14	Tensão da onda quadrada de entrada	38
4.15	Tensão à saída	39
4.16	Variação da resposta da tensão de saída em relação à constante de tempo de integração	39
4.17	Forma de onda da tensão à saída	40
4.18	Comutação de I _{bat} em resposta à variação de V _{in}	40
4.19	Comutação das correntes individuais em resposta à variação de V _{in}	41

4.20	Forma de onda de I_{bat}	41
4.21	Forma de onda das correntes individuais já estabilizadas	41
4.22	Análise em frequência das correntes da bateria e individual	42
4.23	Circuito de potência da terceira emulação	43
4.24	Comutação das correntes individuais com diferentes impedâncias	43
4.25	Forma de onda das correntes individuais com diferentes impedâncias	44
4.26	Análise em frequência com diferentes valores de impedância	44
4.27	Layout de <i>device database editor</i>	45
4.28	Variáveis do IGBT	46
4.29	Circuito adicional do IGBT	46
4.30	Perdas totais nos semicondutores	47

Abreviaturas e Símbolos

A	Ampere
AC	Alternating Current
C	Coulomb
CO ₂	Dióxido de Carbono
DC	Direct Current
EDLC	Electric double-layer capacitor
ESS	Energy Storage Systems
F	Constante de Faraday
°C	Grau Celsius
H	Henry
Hz	Hertz
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IP	Inovation Programmes
K	Kelvin
k	kilo (x1000)
kg	Quilograma
km	Quilómetro
M	Mega (*10 ⁶)
m	Mili (*10 ⁻³)
OHCS	Overhead Catenary System
Ω	Ohm
PEM	Proton exchange membrane
PWM	Pulse Width Modulation
R	Constante Universal de Gases Perfeitos
s	Segundo
S2R	Shift2Rail
SCCM	Standard Cube Centimeter per Minute
SoC	State of Charge
T	Temperatura
TD	Technology Demonstrator
TPS	Traction Power Supply
UE	União Europeia
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt hora

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, será realizada uma introdução ao trabalho desenvolvido na presente dissertação. Nele constam o enquadramento e a definição do problema, bem como a motivação para a realização do mesmo e os objetivos deste projeto.

1.1 Enquadramento

Esta dissertação surge no contexto de um projeto da união europeia, Shift2Rail. Este grande projeto de engenharia europeu está dividido em vários IP, cobrindo todas as estruturas técnicas e funcionais dos variados sub-sistemas do sistema ferroviário. Esta dissertação terá especial interesse na área da tração elétrica ferroviária de potência baseada em baterias.

Esta tecnologia foca-se, principalmente, no último trecho do percurso do comboio, a denominada *Last Mile*. Com o intuito de fazer chegar os comboios ao centro das grandes cidades e aos grandes centros de distribuição, surge a necessidade de estes serem equipados com baterias de elevada potência, sendo assim desnecessária a existência de catenária nesse percurso.

1.2 Definição do problema

Last Mile é uma expressão comum, usada em contexto ferroviário, quer a nível de mercadorias, quer a nível de passageiros, sublinhando as características únicas e os desafios de movimentação no ambiente urbano, definindo assim o último trecho do percurso.

Este desafio também engloba o problema de alimentação da bateria, necessitando previamente da conversão de tensão e corrente, tal como a descarga da mesma, ou seja o problema de carga/descarga da bateria.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de armazenamento de energia de elevada potência, para aplicação em comboios. Para tal, este trabalho tem vários objetivos

a serem cumpridos:

- Estudo de topologias e de métodos de controlo da conversão DC/DC para carga/descarga das baterias;
- Estudo quer a nível económico, quer a nível geográfico, da melhor solução previamente escolhida;
- Desenvolvimento de um algoritmo de controlo do nível de corrente e de tensão presente na bateria;
- Projeto, simulação, verificação, validação e análise da topologia selecionada.

1.4 Motivação

Com uma preocupação crescente em relação a problemas ambientais, e ao mesmo tempo a escassez de fazer chegar, de forma prática e em grande número, bens e pessoas aos grandes centros urbanos, surge a necessidade de desenvolver uma maneira limpa e segura de movimentação [7].

Como se sabe, os comboios e a locomoção ferroviária são a forma de movimentação mais amiga do ambiente, com menores emissões de CO₂ e consumo de energia, mas existem alturas em que esta energia não pode ser fornecida, devido à inexistência das infraestruturas necessárias. Assim, a presente dissertação focar-se-á na necessidade de armazenar energia quando esta estiver disponível, para que a mesma possa ser utilizada quando for necessária (como é caso onde a linha catenária não existe).

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica e a serão estudados os diversos sistemas que esta dissertação engloba. O objetivo desta dissertação é projetar um sistema de armazenamento de energia.

Uma forma de armazenar seria criar um sistema de armazenamento de energia(ESS). Estes ESS pode ser instalado na linha, absorvendo e fornecendo energia a qualquer comboio presente na linha, quando necessitar ou, com maior interesse para esta dissertação, pode ser instalado a bordo do veículo, permitindo a este, quando não estiver a ser fornecida energia, a utilização desta, mantendo-se assim em movimento, capaz de chegar a destinos onde previamente não chegaria. A energia será direcionada para o barramento DC da zona de tração. Na zona de tração existirá um conversor DC/AC para alimentação dos motores trifásicos. Zona de tração não será um ponto a ser abordado nesta dissertação.

A ESS está dividida em três grandes módulos [8]:

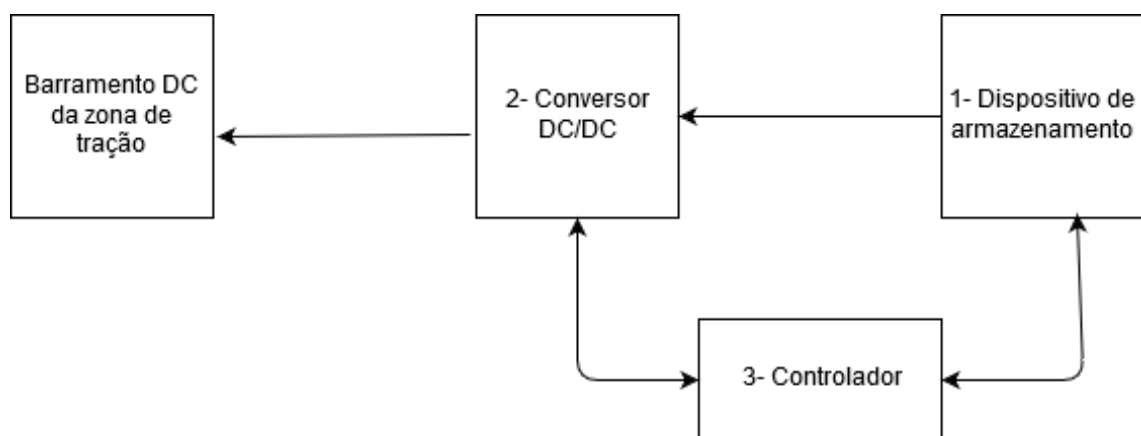


Figura 2.1: Diagrama base de uma ESS

1. Dispositivo de armazenamento em si, a bateria;
2. Conversor DC/DC;
3. Controlador do processo de descarga.

2.2 Programa Shift2Rail

O programa Shift2Rail é um grande programa de engenharia a nível europeu, com a finalidade de inovar e melhorar os sistemas de transportes do velho continente. Este programa foca-se no melhoramento dos transportes ferroviários, criando métodos inovadores em relação à sua eficiência ao nível de recursos, segurança de fornecimento de energia e alterações das condições climatéricas, aumentando assim a competitividade dos comboios face a outros meios de movimentação.

Como é referido em [9], a estrutura do plano é dividida em cinco *Innovation Programmes*, cobrindo todas as diferenças técnicas e funcionais de todos os sub-sistemas presentes no sistema ferroviário. Estes cinco IP não estão isolados, são abordados como aspetos e temas diferentes, mas todos eles se interligam através de vários fatores, como o da expansão sócio-económica ou da sustentabilidade do sistema ferroviário.

Esta dissertação, desenvolverá uma inovadora tecnologia para o sistema ferroviário e como tal estará presente em quase todos os IP presentes no programa. Sendo um projeto base, desenvolvendo e demonstrado uma tecnologia testada em laboratório, esta é denominada de *Technology Demonstrator* (TD), elemento base na cadeia do grande programa.

2.2.1 IP1: *Cost-efficient and reliable trains, including high capacity trains and high speed trains*

Este IP tem como desafio e ao mesmo tempo objetivo melhorar o conforto, a acessibilidade ou até mesmo o próprio aspeto do comboio, tornando-o mais atrativo e acolhedor.

Neste IP, a dissertação cumpre, ou planeia cumprir, alguns objetivos propostos, em especial na redução de custos do sistema, pois com a criação do módulo de baterias, proporciona características inovadoras ao nível da tração, diminuindo emissões de gases, barulho e vibrações, tornando o comboio um meio de transporte mais utilizado pela sociedade. O facto de ser uma tecnologia passível de ser testada em laboratório em vez de necessitar de testes na linha, é um aspeto que abona a seu favor, visto não ser necessário autorizações especiais para testes nem gastos extraordinários na resolução de erros.

2.2.2 IP3: *Cost Efficient and Reliable High Capacity Infrastructure*

Este IP tem como desafio a sustentabilidade, manutenção, segurança e todo o trabalho em volta das infraestruturas.

Também aqui a dissertação tem espaço de investigação e inovação, com destaque na área da eficiência energética. Nesta área é desenvolvida a tecnologia necessária para a regeneração de

energia, que carregará a bateria. Esta será recolhida nos processos de travagem do comboio, a partir dos conversores necessários para a sua conversão, visto o seu fornecimento ser feito a partir da catenária, em corrente alternada e ser, posteriormente, descarregada sob a forma de corrente contínua. Esta conversão será feita de forma reversível, facilitando assim a alteração do estado de utilização da bateria.

2.2.3 IP5: Technologies for Sustainable and Attractive European Rail Freight

Este IP tem como desafio o aumento de serviços de comboios de carga ao nível da UE e o aumento da produtividade, diminuindo o tempo de entrega e o custo de serviço.

É neste IP que a dissertação tem maior interesse, com o desenvolvimento de tecnologia capaz de percorrer um caminho que até agora não é possível, tornando este tipo de serviço muito mais prestável. Para tal, serão estudadas formas de fornecimento de potência elétrica. O facto de possuir duas formas de tração possibilita viagens de comboios com maior dimensões, reduzindo os custos, otimizando assim todo o processo. A eletrificação dos carris e o desenvolvimento da nova forma de tração reduz a poluição e o barulho criado pelo comboio, sendo assim um grande impulsionador desta tecnologia para o problema da *Last Mile*.

2.3 Ausência da Catenária

A linha catenária é a linha fornecedora de energia ao comboio, proporcionando assim a sua movimentação. Estas são essenciais para o transporte ferroviário, mas no entanto estas não cobrem toda a área do país, estando principalmente ausentes nos grandes centros urbanos devido aos impactos ecológicos e paisagísticos, restringindo assim os acessos dos comboios. Com a introdução do módulo de baterias no comboio, os comboios poderão fazer uma curta viagem, chegando assim onde até agora não lhes é possibilitado.

Como referido anteriormente, as baterias teriam que ser carregadas quando o comboio estiver em zonas na presença de catenária. Para controlar a transição entre a zona com e zona sem catenária será necessário a utilização de sensores de deteção de tensão tal como transístores para proteção contra picos de corrente entrando numa zona com catenária, ou contra uma descarga descontrolada [10].

2.4 Sistemas de fornecimento de potência das linhas ferroviárias elétricas

O fornecimento de potência às zonas de tração provenientes das linhas férreas não é único nem exclusivo. Existem várias topologias de fornecimento, diferenciadas pelos valores nominais de tensão e frequência. Estas topologias variam consoante objetivo ou posição geográfica onde a linha se insere [1].

Na rede ferroviária europeia estão presentes as diversas tipologias:

- 25 kV AC 50 Hz;
- 15 kV AC 16 2/3 Hz;
- Linhas DC.

Destas topologias, a mais utilizada a nível mundial é 25 kV AC 50 Hz, seguida das linhas DC (em especial linha DC 3000 V). A menos utilizada é 15 kV AC 16 2/3 Hz, em que a sua utilização se concentra na Alemanha, Áustria, Suíça, Noruega e Suécia [2].

2.4.1 Linhas 25kV AC 50Hz

Em todos os sistemas cuja frequência de operação seja 60 Hz, frequência das redes elétricas nacionais forem 60 Hz, serão englobados nos sistemas de 50 Hz [2]. As linhas de 25 kV surgiram como forma de diminuir o tempo das viagens, correspondendo assim aos requerimentos de alta velocidade. Devido ao facto de serem as linhas ideais para altas velocidades, ao longo dos anos, a maioria das linhas na Europa foram desenvolvidas nesta tipologia, 25 kV 50 Hz monofásico, vulgarmente denominado sistema de potência "1*25 kV". Comparando com as outras tipologias, DC e linhas AC de menor tensão, 1*25 kV apresenta vantagem a nível económico, com foco no número reduzido de subestações de tração. A utilização dos 50 Hz elimina a considerável despesa necessária na geração de energia independente, ou sua conversão, que as outras topologias necessitam pelo facto de não utilizarem a principal frequência nacional.

Posteriormente, de forma a melhorar a eficiência dos sistemas ferroviários, aumentando quase para o dobro a distância entre subestações adjacentes, o sistema foi atualizado e melhorado para um sistema de potência "2*25 kV"($\pm 25kV$) [1].

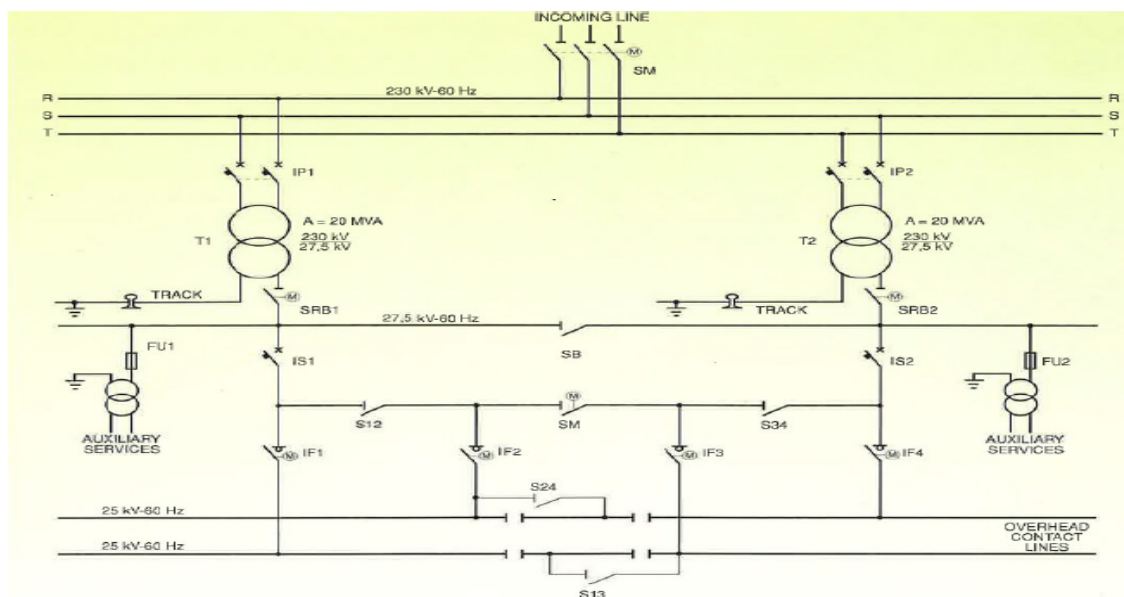


Figura 2.2: Diagrama sistema 1*25 kV [1]

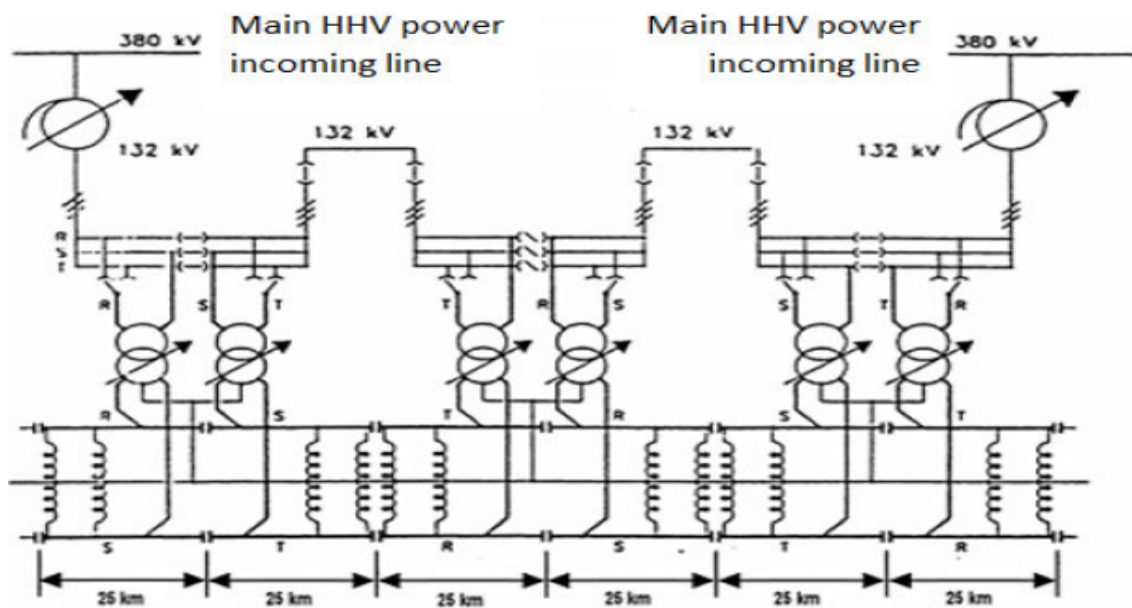


Figura 2.3: Diagrama sistema 2*25 kV [1]

Cada topologia possui diferentes subsistemas de tração e fornecimento de energia, *Traction power supply (TPS)*. Este subsistema tem como objetivos reduzir os níveis de tensão para o sistema da linha catenária (OHCS), provenientes da rede de energia através dos transformadores e proteção do equipamento do TPS e OHCS através de desconectores.

Ao longo da linha, em especial zonas com baixa densidade populacional, sistemas de auto-transformadores serão utilizados em substituição de subestações. Com os auto-transformadores é possível aumentar a tensão de operação do sistema, reduzindo a queda de tensão. Os auto-transformadores são utilizados de forma a gerar um segundo nível de tensão, desfasado 180°, gerando assim -25 kV", que é alimentado por uma segunda linha. Desta forma é possível manter a tensão nominal da catenária [1] [2].

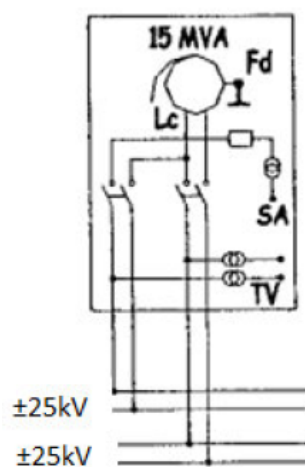


Figura 2.4: Utilização de auto-transformador no TPS [1]

A ligação entre o comboio e o TPS é realizada através da OHCS. Assim é necessário garantir a transferência da potência da tração, de forma segura.

O sistema "2*25 kV" consiste:

- Linha catenária +25 kV;
- Linha de alimentação;
- Circuito de ligação à terra.

2.4.2 Linhas 15 kV AC 16 2/3 Hz

Esta topologia surgiu na Europa central, em 1912, tendo em vista limitar o valor da corrente em motores AC. Assim, diminuiu-se o valor nominal da frequência utilizada nas ferrovias para um terço, originando os 16 2/3 Hz. Posteriormente, em 1996, este valor fixou-se em 16.7 Hz [2].

Visto esta tipologia não operar à frequência da rede elétrica, esta necessita de uma interface com a rede pública.

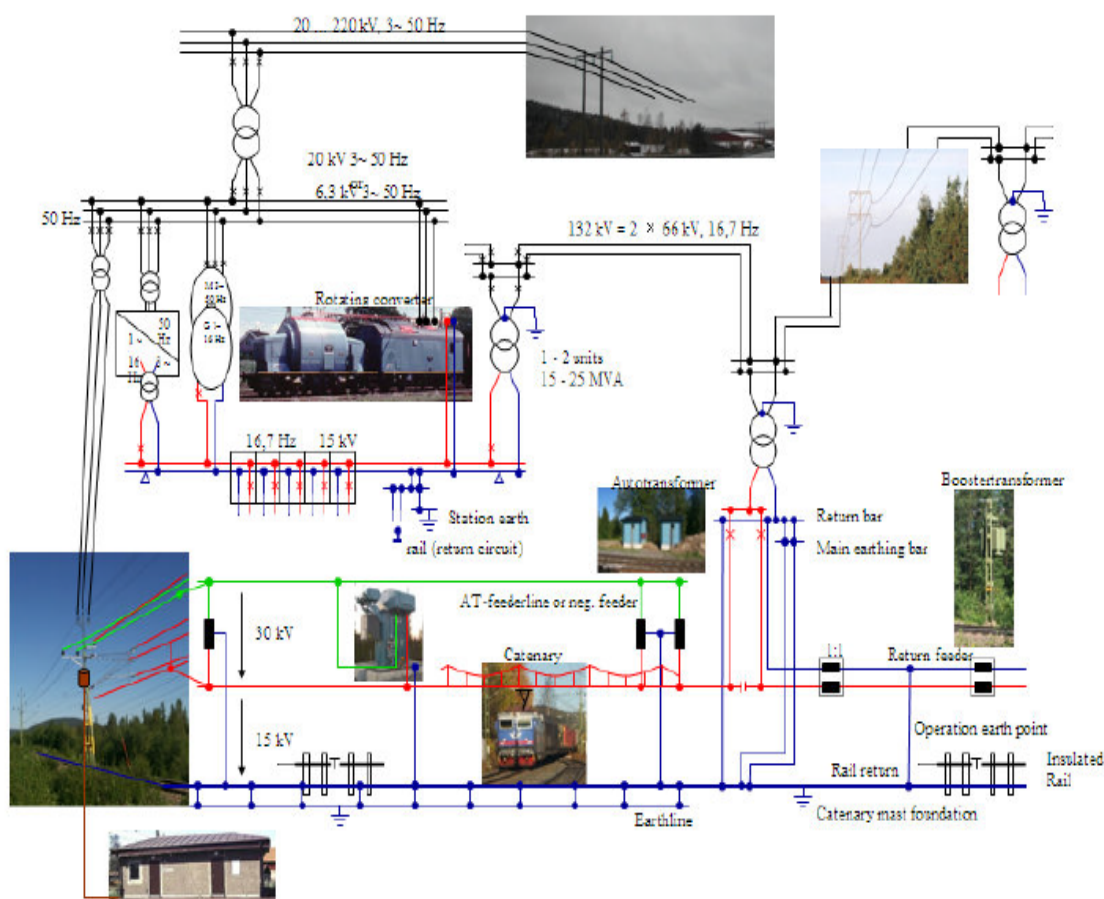


Figura 2.5: Interface da linha de 15 kV 16.7 Hz com rede exterior[1]

Como se pode observar na figura 2.5, toda a energia utilizada é proveniente de rede elétrica nacional, utilizando os 50 Hz. De forma a reduzir o número de estações de fornecimento de

energia ao longo da linha catenária e reduzir o fluxo de energia, existe uma linha de alimentação de alta tensão de duas fases.

A nível do subsistema de tração e fornecimento de energia, esta topologia suporta-se nas estações de fornecimento ou nas subestações de conversão. Nestas subestações pode-se encontrar a secção de conversão do fornecimento, que altera os níveis de tensão, de frequência e o número de fases entre a rede elétrica nacional e a linha catenária. Esta conversão é realizada alterando o nível de tensão do primário (geralmente 220, 130, 70 ou 50 kV), a frequência de 50 Hz e as 3 fases para os 15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz e uma fase no lado da catenária (secundário). Como é possível ver na figura 2.5, os níveis de tensão do primário podem sofrer de uma prévia transformação, para se inserir em valores de conversão adequados. A conversão da frequência é baseada em conversores rotativos. Os valores de tensão do primário são dependentes do nível de funcionamento dos conversores rotativos [1].

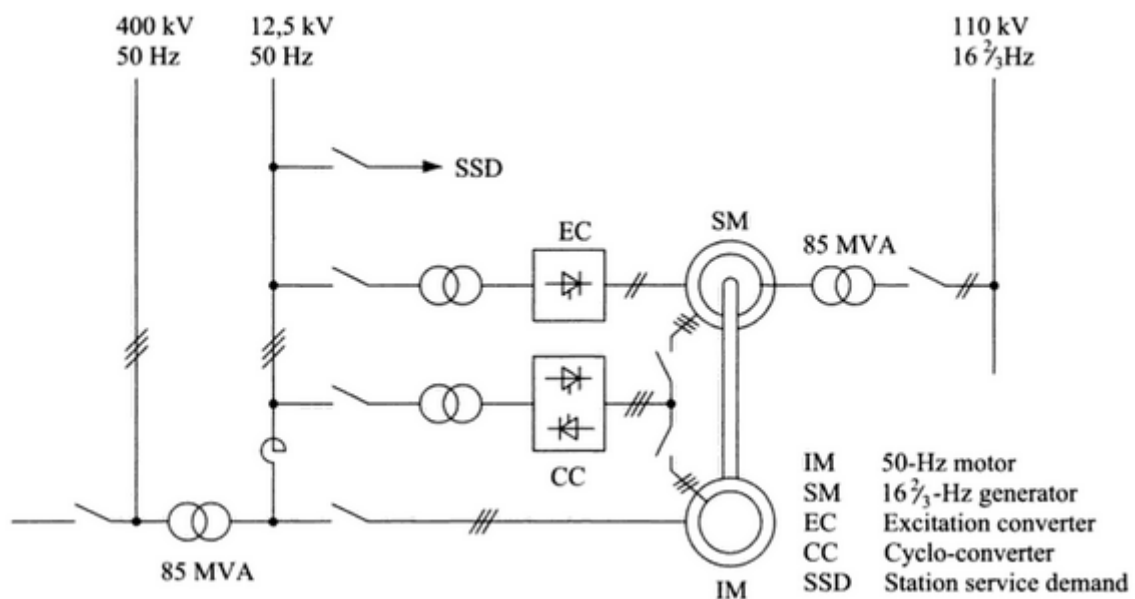


Figura 2.6: Diagrama de conversor rotativo [2]

Nas subestações ainda é possível encontrar a secção de fornecimento do transformador, alterando os valores da catenária para a linha de alimentação de alta tensão e, tal como no sistema "2*25kV", equipamento auxiliar como auto-transformadores, a funcionar a 50Hz[1].

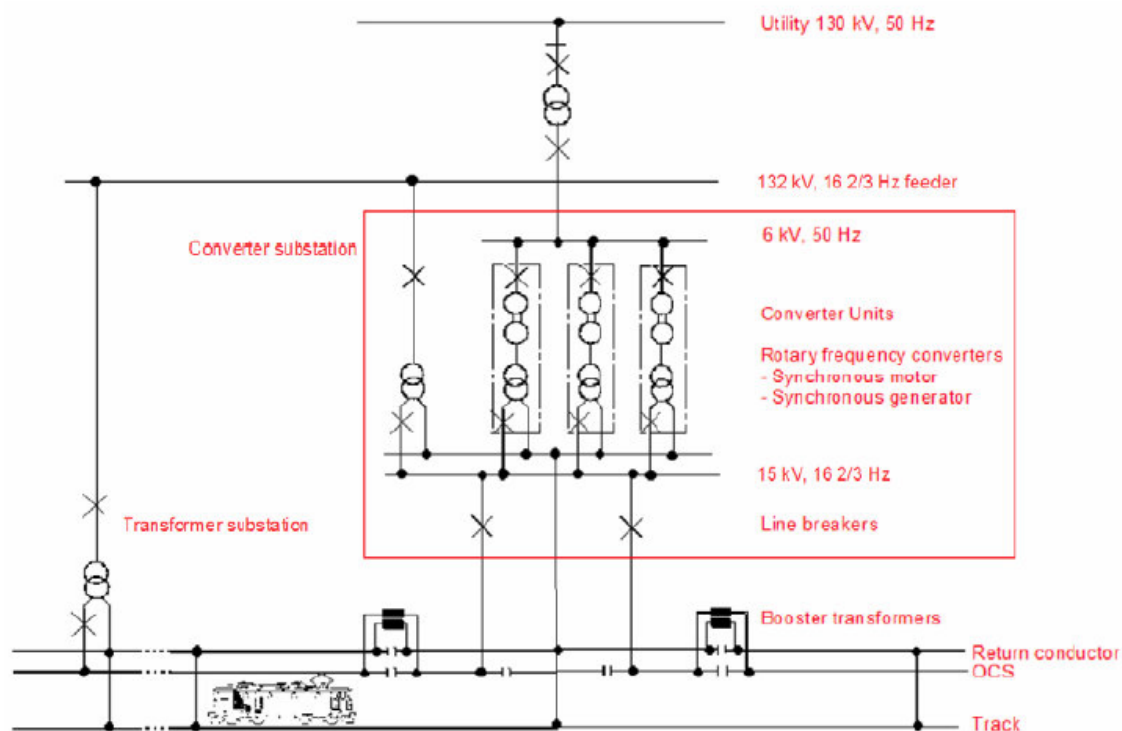


Figura 2.7: Diagrama geral TPS 15 kV [1]

2.4.3 Linhas DC

Existem diversas linhas DC, cada uma delas com diferentes valores nominais e com diferentes especificidades. As mais comuns são as linhas de 3 kV e 1.5 kV. Estas linhas são adotadas, em contexto europeu, por países como a Espanha, Itália, Polónia, Bélgica (3 kV) e Holanda e França (1500 V).

A grande vantagem das linhas DC é a queda de tensão na catenária, pois apenas é influenciada pela sua resistência longitudinal pois a reatância indutiva é sempre zero. Visto o fornecimento de energia ser efetuado em modo DC, as subestações de tração podem ser ligadas em paralelo ao longo da linha, reduzindo assim a queda de tensão. Em contrapartida, a distribuição de energia DC a nível da tração apresenta perdas por corrosão, que nas topologias AC são desprezáveis.

A energia para a zona de tração é fornecida pela rede elétrica pública (50 ou 60 Hz) através de subestações de tração. Dependendo dos níveis de potência necessários pelo sistema, estas subestações podem estar diretamente ligadas à rede ou podem ser alimentadas a partir de uma linha de alta tensão [1].

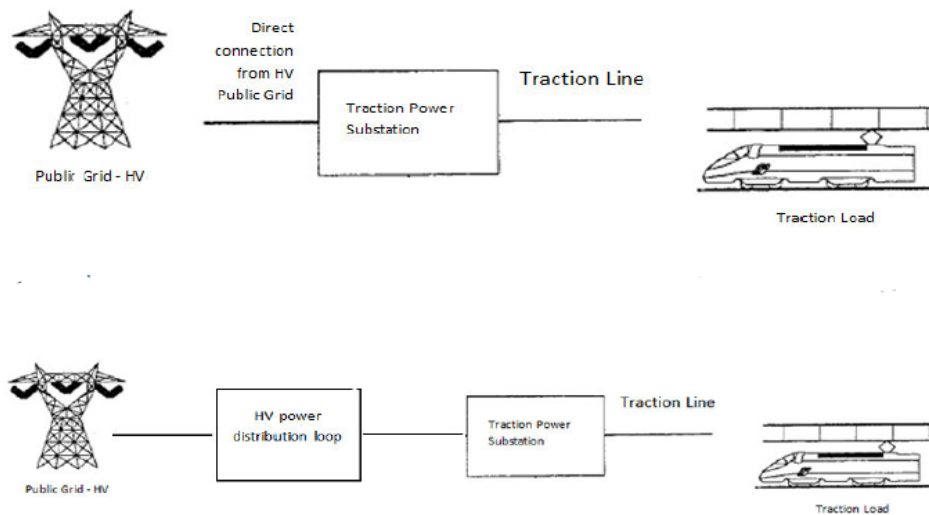


Figura 2.8: Interface das linhas DC com a rede [1]

As subestações de tração têm como objetivo baixar e retificar os níveis de tensão vindos da rede AC para a OHCS (DC 1500-3000V) através de transformadores e retificadores. Têm também como objetivo proteger o equipamento utilizado na TPS e OHCS, através de circuitos desconectores [1].

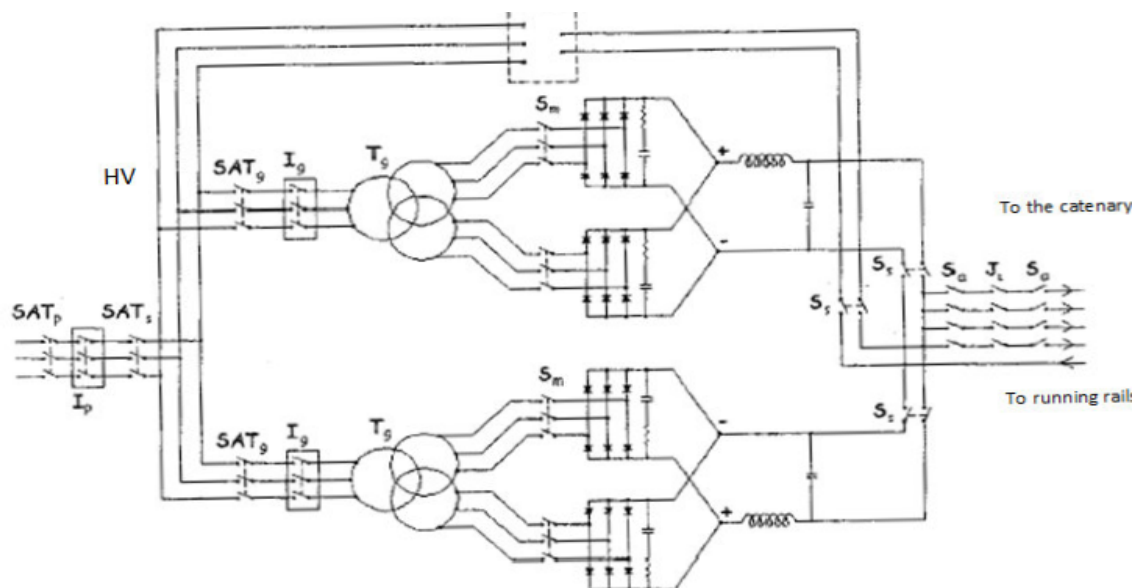


Figura 2.9: Diagrama sistema tração linha 3 kV DC [1]

2.5 Dispositivo de armazenamento de energia

Dispositivo de armazenamento de energia, é o elemento da ESS que, como o nome indica, armazena a energia para quando esta for necessária por parte do sistema, em particular quando não é possível aceder à energia proveniente da catenária. A sua qualidade e eficiência irão depender da tecnologia utilizada e suas características. Visto ter como aplicação o funcionamento num transporte ferroviário, esta deverá responder as suas necessidades inerentes, tais como grandes picos de descarga, quando o comboio acelera, capacidade energética capaz de percorrer distância desejada, por volta dos 2Km e visto ser um dispositivo a integrar num comboio, terá que ter volume e peso não extraordinariamente elevados, de forma a ser móvel, e também ter em atenção as características ambientais e a componente monetária de todas as tecnologias [8].

O objetivo do dispositivo de armazenamento será ter eletricidade disponível quando esta for requisitada pelos motores a bordo do comboio. Esta eletricidade não necessita ser armazenada diretamente, podendo assim ser armazenada de formas diferentes e mais económicas e ser transformada quando esta for necessária. Assim, existem diversas formas de armazenar eletricidade, podendo ser classificadas da seguinte forma:

1. Armazenamento sob a forma de energia elétrica: Armazenamento de energia elétrica recorrendo a condensadores e super-condensadores (EDLC's);
2. Armazenamento sob a forma de energia mecânica: Armazenamento de energia cinética utilizando flywheels;
3. Armazenamento sob a forma de energia química: Armazenamento de energia eletroquímica, usando baterias, como baterias de ácido de chumbo ou iões lítio. Armazenamento de energia química, com uso de células de combustível de hidrogénio ou metanol [3].

2.5.1 Condensadores eletroquímicos de dupla camada (EDLC)

EDLC's, mais recorrentemente conhecidos por super-condensadores, são aparelhos de armazenamento de energia com funcionamento idêntico aos comuns condensadores eletrolíticos. A energia é armazenada em campos eletrostáticos, sem a ocorrência de reações químicas. Os EDLC's têm uma grande área da superfície do eletrodo e permitividade dielétrica alta, obtendo assim uma enorme densidade de energia, em comparação com condensadores convencionais.

Como os EDLC's, idealmente, não apresentam reações químicas nos eletrodos, possuem resistência interna bastante baixa, obtendo assim grandes eficiências (~95%). Devido as suas características, os super-condensadores permitem processos de descarregamento muito rápidos, com correntes elevadas, podem ser na ordem dos milissegundos. Tendo em conta a finalidade do projeto, para que o sistema de armazenamento tivesse autonomia suficiente para todo o seu percurso, iria ser necessária a existência de quantidades exorbitantes de EDLC's, sendo assim um dos pontos negativos desta tecnologia.

Super-condensadores têm alta densidade de potência (~4000 W/Kg), mas baixa densidade de energia (~10 Wh/Kg), 10^6 ciclos de carga e descarga, estado de carga (SoC) facilmente detetável

através da medição da tensão nos seus terminais, mas apresentam rácios de auto descarga elevados [3] [8].

2.5.2 Flywheels

Flywheels são dispositivos de armazenamento de energia eletromecânico, armazenando energia cinética no rotor. A energia armazenada será proporcional à inércia do rotor e ao quadrado da sua velocidade de rotação. O rotor do flywheel está ligado a uma máquina elétrica, que durante o carregamento funcionará como um motor, e durante a descarga funcionará como um gerador, produzindo eletricidade da energia rotacional do flywheel. A energia total do flywheel é dependente do tamanho e da velocidade do rotor.

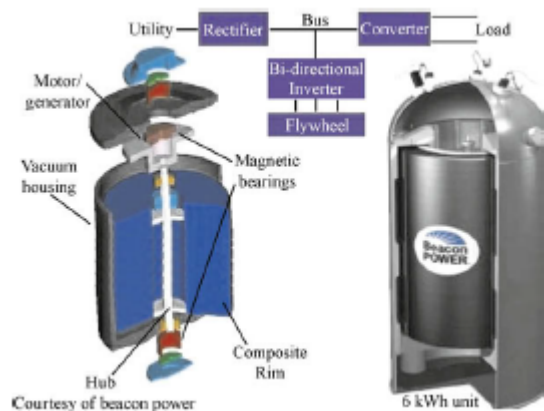


Figura 2.10: Sistema flywheel [3]

As vantagens dos flywheels em relação a outras tecnologias de armazenamento são o seu rápido ciclo de carga-descarga, possibilitando um número infinito de ciclos. Também apresentam elevada eficiência (~95%), e grandes densidades de potência e energia (1000-5000 W/Kg e <50 Wh/Kg, respetivamente). O seu SoC é facilmente medido em função da sua velocidade angular.

Estes dispositivos têm como grande desvantagem um potencial risco de explosão, tornando-o assim extremamente perigoso para o uso em transportes, como é o caso. Também são bastante pesados, sendo este também um dos critérios de seleção, e possuem grandes rácios de descarga [3] [8].

2.5.3 Baterias

Baterias são dispositivos de armazenamento de eletricidade na forma de energia química. As baterias armazenam e distribuem energia através de reações químicas inerentes a dois materiais diferentes, os elétrodos. Os elétrodos, cátodo (elétrodo positivo) e ânodo (elétrodo negativo), são submersos num eletrólito [3].

Baterias são conjunto de células, ligadas em série. Em cada uma das células ocorre uma reação química. À medida que a reação progride, estabelece-se um fluxo contínuo de eletrões, produzindo assim corrente elétrica contínua [4].

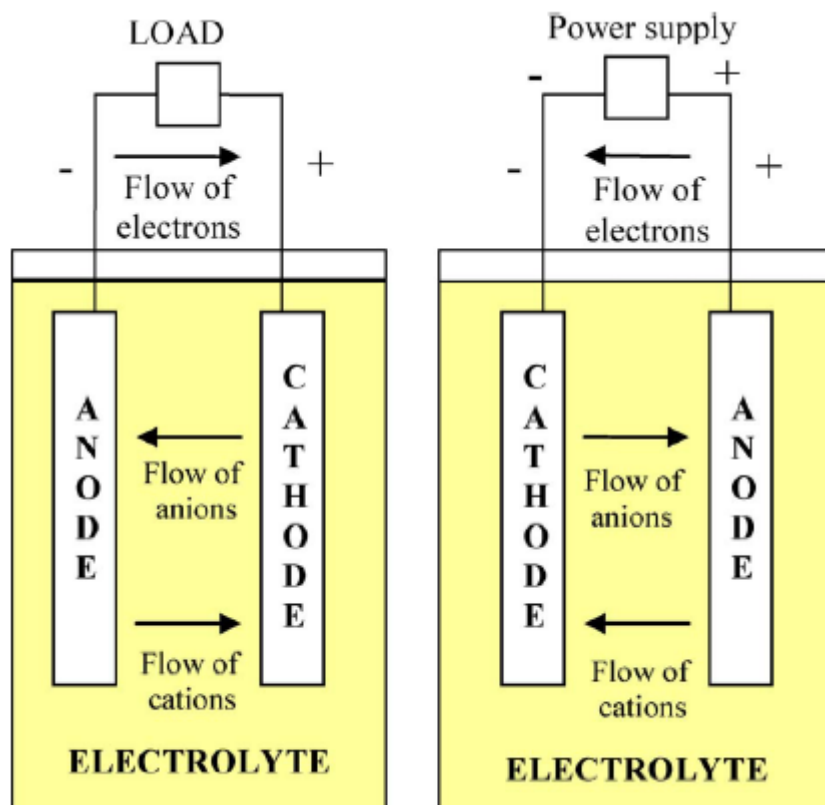


Figura 2.11: Funcionamento base baterias [4]

2.5.3.1 Baterias de ácido de chumbo(Pb)

Baterias de ácido de chumbo são o sistema de armazenamento mais antigo e mais usado, apresentando uma grande fiabilidade. Em carga, os elétrodos são feitos de chumbo e óxido de chumbo e o eletrólito uma solução de ácido sulfúrico. Na descarga, ambos os elétrodos tornam-se sulfato de chumbo e o eletrólito fica principalmente água.

No ânodo ocorre a seguinte reação química:



No cátodo:

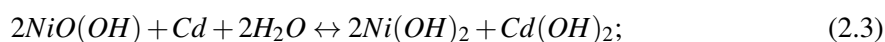


Estas baterias são baratas, em relação a outras técnicas de armazenamento e possuem altas eficiências (70-90%). Têm grande densidade de potência (25-300 W/Kg) mas baixa densidade energética (20-50 Wh/Kg). Apresentam um curto tempo de vida, de 500-1000 ciclos de carga-descarga, mas tem um rácio de auto descarga bastante baixo.

Estas baterias têm também como desvantagem a sua performance a baixas temperaturas, necessitando de um sistema de controlo de temperatura, não conseguem ser completamente descarregadas e influenciam negativamente o ambiente, devido ao processamento do chumbo [3] [8].

2.5.3.2 Baterias de níquel e cádmio(NiCd)

Juntamente com as baterias de ácido de chumbo, as baterias de níquel cádmio são as que são utilizadas há mais tempo, demonstrando assim a sua fiabilidade. O eléctrodo positivo (cátodo) desta bateria é feito de hidróxido de níquel e o eléctrodo negativo (ânodo) de hidróxido de cádmio. O eletrólito desta bateria é uma solução alcalina. Nesta tipo de tecnologia ocorre a seguinte reação:



As baterias de níquel são baterias robustas e necessitam de pouca manutenção, mas no entanto, o seu ciclo de vida é baixo, 2000-2500 ciclos de carga-descarga. Têm grande densidade energética (50-75 Wh/Kg) e de potência (50-300 W/Kg).

As grandes desvantagens desta tecnologia são o seu custo relativamente elevado (\$1000/kWh), a sua eficiência não propriamente elevada (60~80%), grande nível de auto descarga e o facto de o cádmio ser um metal pesado, tóxico, tornado-se assim atrás das outras tecnologias, visto o impacto ambiental ser também um dos parâmetros de escolha [3] [8].

2.5.3.3 Baterias de sódio(NaS)

Este tipo de bateria consiste em enxofre fundido como catião e sódio fundido como anião com eletrólito de cerâmica de alumínio sólido a separá-los. O eletrólito apenas permite os iões positivos presentes no sódio de atravessar, combinando com o enxofre, ocorrendo a seguinte reação:



Durante a descarga, visto que apenas os iões positivos de sódio atravessam o eletrólito, os eletrões fluem no circuito externo da bateria, produzindo cerca de 2.0V.

As baterias NaS, são baterias eficientes (75~90%), com elevados níveis de densidade de potência e energética (150-230 W/Kg e 150-240 Wh/Kg respetivamente) e com ciclos de vida de cerca 2500 ciclos carga-descarga.

A grande desvantagem é a elevada temperatura de funcionamento (~300°C), necessitando assim de fonte de calor para manter estas temperaturas, originando assim um grande nível de auto descargas. Outra desvantagem desta bateria é o seu custo (\$300-500/kwh), bastante elevado em comparação com as baterias de chumbo [3] [8].

2.5.3.4 Baterias de iões lítio (Li-ion)

As baterias de iões lítio são as baterias com futuro mais promissor dentro de todas as que aqui foram referidas. Apesar de no presente, as baterias de ácido de chumbo serem as mais comuns,

as baterias de íons lítio estão rapidamente a ocupar o seu lugar sendo, num futuro próximo, as mais presentes no mercado. Estas baterias são compostas por um metal de lítio oxidado como catião e ânodo composto por camadas de grafite. Ao serem carregadas, os átomos de lítio no catião tornam-se íons e migram através do eletrólito para o ânodo de carbono, que juntamente com os eletrões externos se depositam nas camadas de grafite como átomos lítio. Enquanto estão a ser descarregadas, o processo é exatamente o inverso.

Estas baterias têm características bastantes competitivas em relação às outras tecnologias, com uma enorme eficiência de quase 100%, grandes densidades de potência e energia (350 W/Kg e 200 Wh/Kg respetivamente). Apresentam ciclo de vida bastante elevado, podendo alcançar 10000 ciclos carga-descarga e baixo nível de auto descarga.

A grande desvantagem das baterias Li-ion é o seu elevado custo (>\$500/ kWh), que se deve ao facto da necessidade de existência de circuitos de proteção [3] [8].

2.5.3.5 Células de combustível

Células de combustível são dispositivos de conversão de energia eletroquímica. Produzem eletricidade através de fontes de combustíveis externas como o hidrogénio e o metanol ao ânodo e de oxidante como o oxigénio ao cátodo. Estes reagem na presença dum eletrólito.

As células de combustível diferem das baterias na forma como estas consomem os reagentes e necessitam de ter um fornecimento contínuo de reagentes para funcionar, enquanto que as baterias armazenam eletricidade sob a forma de energia química num circuito fechado [11].

Estes sistemas possuem vantagens nas suas características, como a densidade energética (0.6-1.2 kWh/Kg), grande capacidade, na ordem dos MW e níveis de auto descarga praticamente nulos.

A maior desvantagem das células de combustível é a sua eficiência, sendo inferior a 50%, muito abaixo das restantes tecnologias previamente vistas [3].

2.6 Conversor DC/DC

O conversor DC/DC é o elemento da ESS que conecta o dispositivo de armazenamento com o barramento DC da zona de tração. Este elemento está encarregue pelo transporte e conversão da energia proveniente da bateria para o barramento DC, zona onde será necessária, ou, se necessário também percorrer energia com o fluxo inverso, aumentando assim o SoC da bateria.

Dependendo da finalidade do conversor, este pode ter vários modos de funcionamento. Se o objetivo for aumentar o nível de tensão, obtendo um valor à saída superior em relação à entrada designa-se um conversor aumentador (*boost*). Se por outro lado, o objetivo é diminuir o valor de tensão, designa-se conversor abaixador (*buck*). Um conversor com capacidade de fluir corrente em ambas as direções designa-se de conversor bidirecional. Em qualquer uma das topologias, o conversor DC/DC é composto por[12]:

- Circuito principal (circuito de potência) do conversor;
- Controlador do conversor DC/DC.

2.6.1 Circuito principal

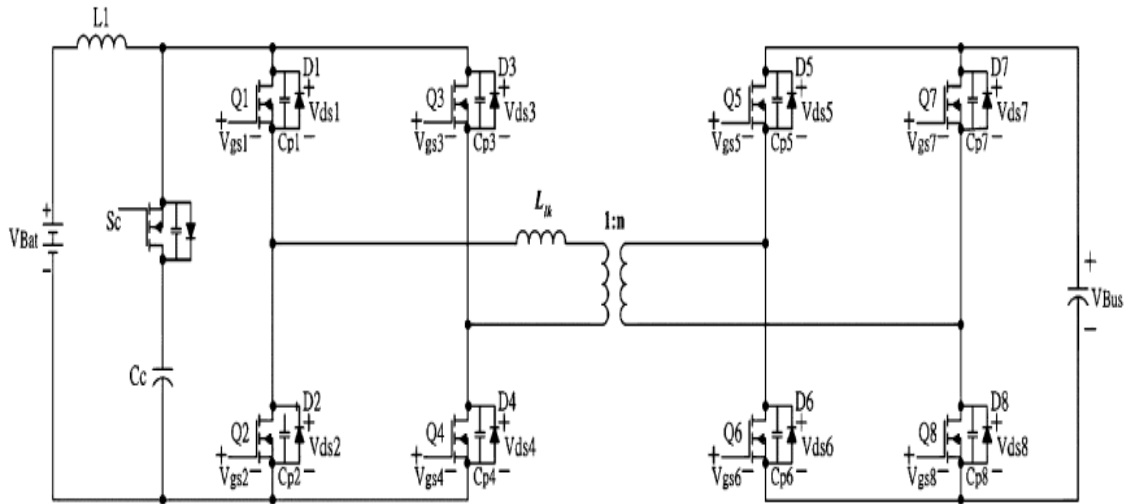


Figura 2.12: Circuito de potência conversor DC/DC [5]

O circuito da imagem 2.12 representa a tipologia bidirecional. Nele são apresentados IGBT's de alta tensão e alta corrente ligados em paralelo, o dispositivo de armazenamento representado pela fonte de tensão do lado esquerda da figura e o barramento DC de tração, representado pelo condensador do lado direito da figura. Dependendo da direção do fluxo de energia, o modo de funcionamento do conversor altera-se. Inserindo este circuito no contexto desta dissertação, o lado da bateria representará o lado de baixa tensão e a zona de tração representará o lado de alta tensão. Assim, se a corrente fluir em direção à zona de tração, a bateria encontrar-se-á a descarregar e o conversor apresentará modo de funcionamento *boost*. Se o contrário suceder, então funcionará em modo *buck* e a bateria estará a ser carregada [5].

De forma a reduzir o tamanho dos conversores, uma estratégia de entrelaçamento de conversores elementares pode ser adotada, associando vários elementares em paralelo. Todos os conversores elementares são controlados pelo mesmo *duty cycle* enquanto que as ordens de acionamento dos IGBT's são desfasadas. Sendo dois conversores elementares idênticos, a corrente em cada um deles serão idênticas, ou tenderão para tal, estando forçosamente desfasadas [13].

2.6.2 Controlador

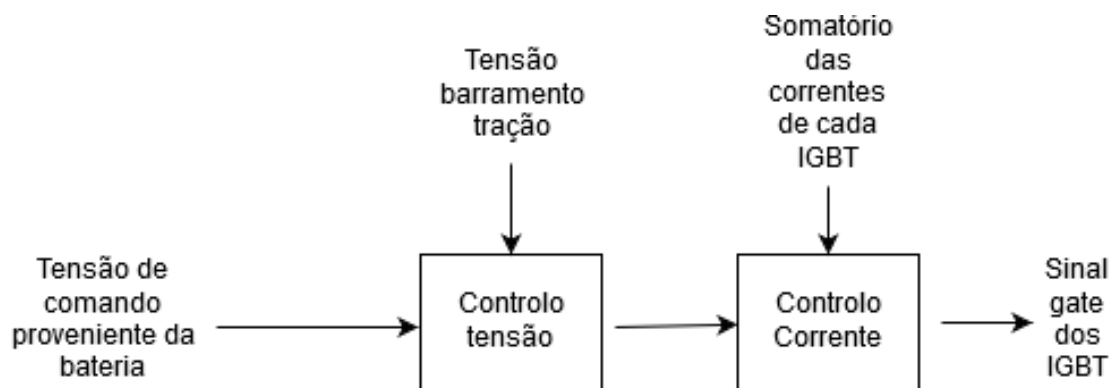


Figura 2.13: Diagrama controlo conversor DC/DC

A figura 2.13 representa o diagrama base de controlo de um conversor DC/DC. A entrada do controlador do conversor é o comando proveniente da bateria e emite sinais de comando para a gate de cada IGBT no circuito principal. O controlo é baseado em dois módulos:

- Controlo tensão;
- Controlo corrente.

Ambos os módulos utilizam controladores PI. Controladores PI são controladores PID cujo ganho derivativo é zero. Sendo a saída do PID o somatório da influência de cada ganho com a entrada, se o ganho derivativo é zero, o controlador PID passa a ser um controlador PI. Estes controladores são controladores que tentam corrigir o erro de uma variável tentando atingir o valor pretendido. O dimensionamento destes controladores envolvem a configuração de dois parâmetros: Ganho proporcional e a constante de integração. O ganho proporcional altera a saída de forma proporcional ao erro da variável. Um ganho elevado resulta numa alteração grande na saída. Se for demasiado alto, o sistema poderá tornar-se instável. Por outro lado, um ganho pequeno resulta numa pequena resposta a um erro de entrada elevado tornando-se um controlador menos responsivo. A constante de integração de um controlador influencia não só o seu ganho como também a sua duração. Menor constante de tempo, a resposta ao sistema será maior mas poderá ser mais instável, *overshoot* maior, por outro lado, uma maior constante de tempo tornará o sistema mais estável mas reagirá mais lentamente à perturbação. Um dos métodos mais utilizados para dimensionar controladores PI é o método Ziegler-Nichols. Neste método, a constante de integração é definida como 0. Aumenta-se o valor do ganho proporcional até chegar a um ganho crítico, onde o sistema começa a oscilar. Esta oscilação tem um período, e este período e o ganho crítico definem os valores dos outros ganhos. Num controlador PI, o ganho proporcional é definido como metade do ganho crítico e o ganho integrativo é definido como 1.2 vezes maior que o rácio ganho proporcional sobre ganho crítico [14].

O controlo de tensão tem como entradas o valor da tensão armazenada no condensador à saída, neste contexto valor da tensão do barramento de tração e a tensão de comando proveniente

da bateria. A tensão de alimentação é controlada de forma a manter-se num intervalo de tensão desejado. Para o caso de um conversor bidirecional, cada corrente de alimentação é controlada de forma a que seja o valor médio de todos os conversores elementares. A saída do controlo de tensão é a entrada do controlo de corrente. Este gera sinais de comando para modificar valores ao controlo de corrente.

O controlo de corrente tem como entradas a saída do controlo de tensão e a soma dos valores individuais das correntes em cada IGBT. Esta corrente é controlada de forma a atingir os valores pretendidos e cada corrente individual é controlada de forma a que sejam todas iguais, ou que tendam para tal. A saída deste módulo fará a ligação ao circuito de potência, pois emite os sinais de comando de comutação de cada transístor [12].

Quer no circuito de controlo quer no circuito principal, é várias vezes mencionado o barramento DC da zona de tração e a sua influência. Deste valor dependerá toda a conversão e daí não poder ser arbitrário. Em[15] é possível observar alguns valores passíveis de serem utilizados. A nível de catenárias 3 kV DC, não é necessário nenhum tipo de conversão desde a alimentação até este barramento, fixando-se assim este valor nos 3 kV.

2.7 Conclusão

Neste capítulo foi efetuada a revisão bibliográfica das diversas componentes desta dissertação. Iniciou-se por apresentar o programa em que esta dissertação se insere e a sua integração no mundo ferroviário. De seguida referiu-se a especificidade principal do projeto e suas condicionantes. Posteriormente foram vistos os diversos sistemas de fornecimento de potência e seus componentes.

Para finalizar foram introduzidos dois principais focos de trabalho, o dispositivo de armazenamento de energia, onde foram mencionadas diversas tecnologias e suas características e o conversor DC/DC, onde se apresentou o seu modo de funcionamento e de controlo.

Capítulo 3

Dispositivo de armazenamento (bateria)

3.1 Introdução

Os dispositivos de armazenamento, fazendo parte de um ESS, no contexto de transportes ferroviários são dispositivos extremamente úteis, pois são estes que irão camuflar a inexistência de linha catenária, fornecendo energia à zona de tração do veículo. O objetivo deste capítulo é resumir todas as tecnologias vistas na revisão bibliográfica, comparando-as e realizar a seleção de uma delas para assim ser possível projetar o módulo de baterias.

3.2 Vista geral de tecnologias

Atualmente existe um vasto número de tecnologias capazes de suportar um ESS, porém nenhuma possui todos os requisitos para que a sua escolha seja ideal [16]. Assim ter-se-á que olhar a um grande número de parâmetros, atribuir um peso a cada um, obtendo assim uma escolha fundamentada.

A escolha da ESS depende da potência e energia a ser aplicada, tempo de resposta, peso, volume, temperatura de funcionamento, tempo de vida, custo capital e sua eficiência. Alguns destes parâmetros estão demonstrados na tabela que se segue:

Tabela 3.1: My caption

Tecnologia	Eficiência (%)	Densidade Potência (W/Kg)	Densidade Energia (Wh/Kg)	Auto-descarga (% cap.)	Ciclos Vida	Custo capital (\$/KWh)
EDCL	95	4000	10	20-40	10 ⁶	300-2000
Flywheel	95	1000-5000	<50	100	10 ⁷	1000-5000
Chumbo	70-90	25-300	20-50	0.1-0.3	500-1000	200-400
Níquel-Cádmio	60-80	50-300	50-75	0.2-0.6	2000-2500	1000
Sódio	75-90	150-230	150-240	20	2500	300-500
Iões Lítio	~100	350	200	0.1-0.3	<10000	500-2500
Células combustível	<50	~1500	600-1200	~0	~ ∞	50

Tendo em conta as características apresentadas das diversas tecnologias estudadas, neste momento é possível realizar diversas comparações tecnológicas para realizar a escolha adequada.

Devido à pouca autonomia presente nos EDLC, esta tecnologia não será utilizada nesta dissertação, pois apresentam valores na gama dos 300m e visto ser necessário percorrer-se distâncias maiores, a única maneira desta tecnologia satisfazer esta condição seria um grande aumento no número de super-condensadores a utilizar, tornando demasiadamente grande e pesado, ficando assim uma opção inviável.

A tecnologia flywheel também é uma tecnologia que não será utilizada, visto ter o particular risco de explosão. Este risco associado ao transporte de mercadorias poderá trazer grandes prejuízos as empresas de distribuição bem como causar grande impacto ambiental, dependendo da mercadoria que estará a ser transportada.

Sendo assim, observar-se-á atentamente as vantagens e desvantagens presentes nas características das restantes tecnologias.

A nível de fiabilidade e de maior número de testes realizados, as baterias de ácido de chumbo destacam-se de todas as outras tecnologias, sendo assim a opção mais segura a fazer. Baterias de níquel cádmio e de iões lítio também se demonstram fiáveis, existindo projetos no mercado baseados nestas tecnologias.

Em termos de densidade energética e de potência, a tecnologia que se destaca é a bateria de iões lítio e as células de combustível. Estas características demonstram maior energia e potência por unidade de volume, sendo estas mais compactas, tornando-se assim as mais acessíveis para ser integradas a bordo dos veículos. Baterias de sódio também apresentam níveis superiores as outras tecnologias, referentes a estes parâmetros. No entanto, estas duas tecnologias apresentam desvantagens ao nível da temperatura de funcionamento e, consequentemente, de custo capital.

A tecnologia com maiores níveis de eficiência é a bateria de iões lítio. Esta tecnologia também apresenta a maior durabilidade e nível de auto descarga extremamente baixos, parâmetros relevantes na escolha, visto que a aplicação envolve períodos de tempo reduzidos, na ordem dos minutos, mas que se repetirá por inúmeras vezes, justificando assim o grande investimento de custo capital.

Neste parâmetro, baterias de ácido de chumbo são as que apresentam um menor custo por KWh de energia armazenada.

Por último, mas também relevante, a nível de impacto ambiental, destacam-se pela negativa as tecnologias de bateria de chumbo e de níquel cádmio.

Postos todos estes parâmetros em avaliação, optou-se por aprofundar duas tecnologias:

- Baterias de ácido chumbo, por serem extremamente fiáveis e o seu custo não ser extremamente alto;
- Células de combustível, em especial células de combustível de hidrogénio, pelo facto de ser uma tecnologia em evolução e desperta grande interesse por parte do autor.

3.3 Baterias de ácido chumbo

As baterias de chumbo são a tecnologia existente mais fidedigna e mais utilizada no setor dos transportes. Em condições de funcionamento normais, cada célula de uma bateria de chumbo, por norma produz 2V. No caso dos automóveis, as suas baterias produzem uma tensão de 12V, sendo o seu interior constituído por 6 células ligadas em série. No caso dos transportes ferroviários, notoriamente, os níveis de potência e tensão são extremamente mais elevados, sendo assim necessário um maior número de células. Esta tecnologia é capaz de fornecer grandes quantidades de corrente em intervalos curtos, situação que irá certamente ocorrer, visto variar a necessidade de corrente consoante o percurso que o comboio irá realizar.

Conforme mencionado no capítulo anterior, baterias de chumbo são baterias capazes de serem recarregadas. Recarregar a bateria significa inverter a reação eletroquímica anteriormente apresentada, realizando uma eletrólise, aplicando tensão exterior ao cátodo e ao ânodo.

Olhando para o uso final da bateria, o desenvolvimento de um dispositivo de armazenamento para transportes ferroviários, existe o interesse de determinar o SoC da bateria. Visto que aquando da descarga é consumido ácido sulfúrico, a sua densidade determina o grau de descarga. Este valor, para uma bateria completamente carregada e sem danos estruturais deverá rondar 1,2 g/mL.

Como referido anteriormente, as baterias de chumbo tem uma performance extremamente baixa a baixas temperaturas. Este cenário é demonstrado na dificuldade de pôr os carros a trabalhar em climas frios, pensando que a bateria “morreu”. Este fenómeno deve-se ao aumento da viscosidade do eletrólito, ácido sulfúrico, causando uma movimentação mais lenta dos eletrões, não gerando assim corrente necessária. Para que tal não aconteça, é necessário um circuito exterior de aquecimento, mantendo a temperatura da bateria a uma temperatura ambiente (~25°C).

3.4 Células de combustível

Células de combustível são uma tecnologia de armazenamento de energia química, que necessita de fornecimento contínuo dos reagentes para transformação da energia em eletricidade.

Um sistema de células de combustível consiste numa membrana de troca de eletrões, *proton exchange membrane* (PEM), que consiste em duas placas, dois elétrodos e duas finas camadas de catalisador baseado em platina, separado por uma membrana. Quando esta membrana é alimentada com combustível, uma reação eletroquímica acontece, criando assim eletricidade. Podemos observar o seu funcionamento base na imagem que se segue. O seu funcionamento será posteriormente descrito.

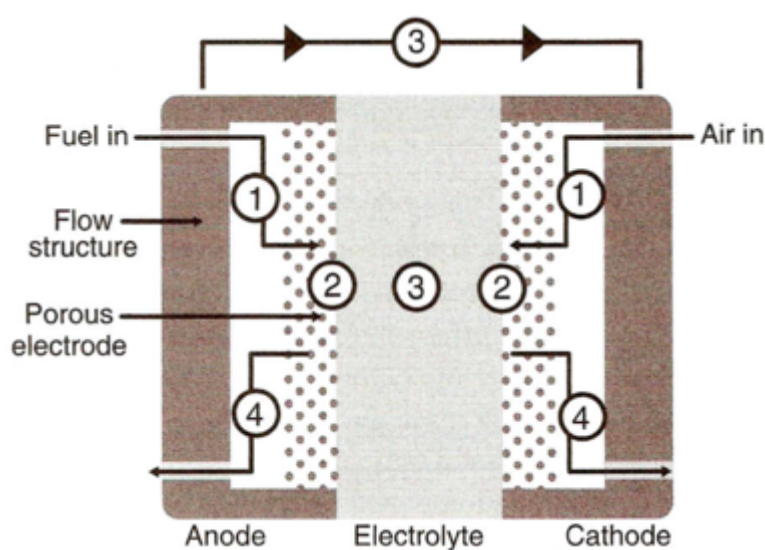


Figura 3.1: Funcionamento célula de combustível [6]

Na imagem apresentada:

1. Transporte de reagentes;
2. Reações eletroquímicas;
3. Transporte de prótons através do eletrólito e eletrões através do circuito exterior;
4. Remoção dos produtos das reações.

Hidrogénio proveniente de um reservatório e oxigénio do ar são introduzidos nos canais das placas. Hidrogénio flui por um dos lados da membrana e oxigénio pelo outro. O catalisador separa a molécula de hidrogénio em eletrões e prótons. Os prótons conseguem atravessar a membrana, enquanto que os eletrões não, e são assim obrigados a passar um circuito externo criando a eletricidade útil.

Do lado do oxigénio da membrana, os iões e^- e H^+ reagem com o oxigénio do ar, na presença de uma segunda camada de catalisador, produzindo água e calor.

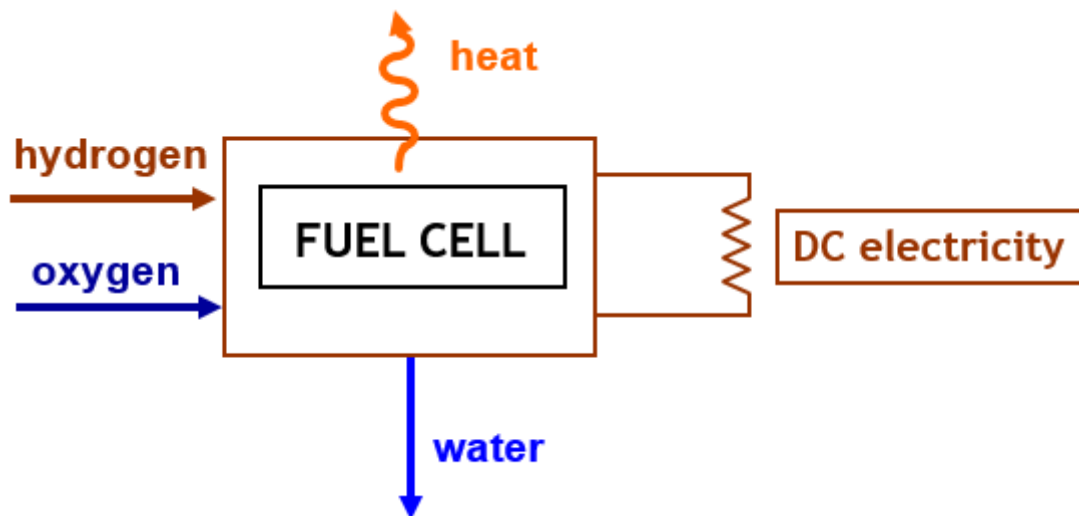


Figura 3.2: Produção de eletricidade numa célula de combustível

O facto de produzir água ao mesmo tempo que produz eletricidade, levou a que a aplicação mais bem sucedida, até ao momento, de um sistema de células de combustível seja no contexto dos veículos espaciais, uma vez que, a água produzida na célula fosse bebida pelos astronautas. Sendo também, água, calor e eletricidade os únicos produtos da reação, tornam esta tecnologia extremamente limpa, sem emissão de ruído ou de elementos poluentes.

Para se alcançar a tensão de saída desejada, é necessário associar células de combustível individuais. Para condições de funcionamento padrão, isto é, temperatura a 25°C, concentração das espécies dissolvidas 1 mol e pressão dos gases 1 atm, podemos associar o potencial de redução padrão (E^0) de cada reação, sendo assim capaz de poder calcular a tensão produzida em cada célula individual [11]:

$$E_{\text{célula}}^0 = E_{\text{catodo}}^0 - E_{\text{anodo}}^0 = 0,40 - (-0,83) = 1,23V; \quad (3.1)$$

Estes valores são valores tabelados, mas foram obtidos apenas para as condições de funcionamento padrão. Para além disso, a modificação dos coeficientes estequiométricos de uma reação não afeta o valor de E^0 , o que significa que este não é afetado pela quantidade de solução presente [11]. Visto as células de combustível apenas apresentarem este funcionamento na sua condição padrão, e esta não ser atingida durante o processo, ter-se-á que ter em conta perdas para poder apresentar um valor de tensão real. Estas perdas serão, por exemplo, perdas de ativação, ohmicas ou de transporte de massas, como é possível observar na imagem que se segue:

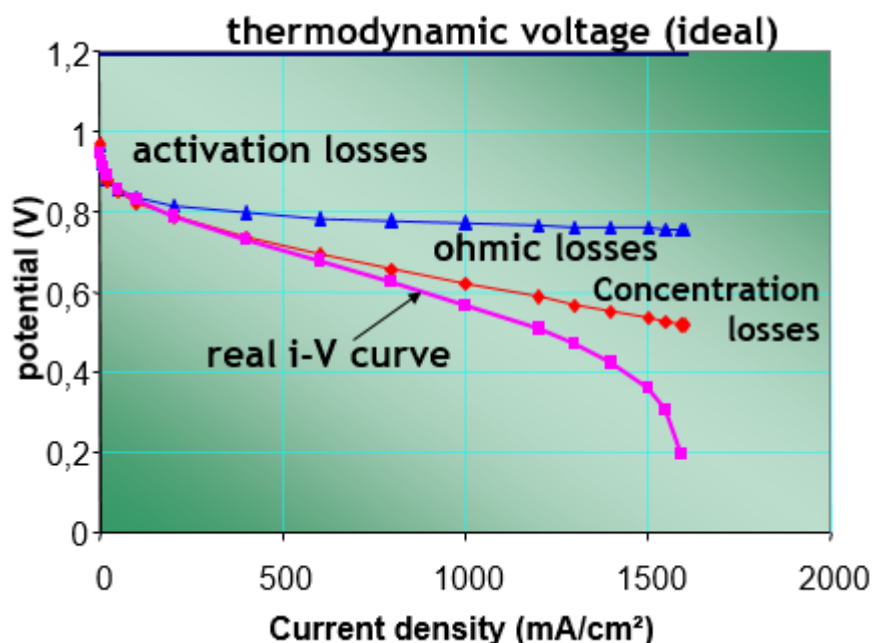


Figura 3.3: Performance célula de combustível. Curva I vs V [6]

Por observação da imagem, irá ser assumida uma tensão de 0,8V produzida em cada célula individual.

Os combustíveis necessários para esta tecnologia ser capaz de produzir eletricidade são o oxigénio, que é extraído do ar, logo extremamente abundante e fácil de obter, e o hidrogénio, que pode ser produzido de diversas formas, como eletrólise da água. Este pode ser armazenado em forma líquida ou de gás comprimido, num reservatório próximo do sistema de células de combustível. Sendo a existência dos seus reagentes abundante e fácil de obter, torna a utilização desta tecnologia fácil de utilizar.

3.5 Especificação do dispositivo de armazenamento

Para ser possível caracterizar o dispositivo, é necessário proceder então à escolha da tecnologia a utilizar. Tendo sido estudadas diversas tecnologias, e aprofundadas as tecnologias de bateria de ácido chumbo e células de combustível de hidrogénio, a tecnologia escolhida para o desenvolvimento da ESS é célula de combustível de hidrogénio, devido aos seus elevados valores de densidade de potência e de energia, bem como o facto de ser uma tecnologia em expansão, que tem muito para evoluir.

3.5.1 Dimensionamento

Sabendo que a bateria será a fonte de tensão do conversor DC/DC que a ligará ao barramento DC de tração, esta terá que ser dimensionada para nele ser inserida. Assim, e como se pode ver em [17], será necessária uma potência de pelo menos 4MW para suportar os gastos da linha, bem como

as variações de tensão. Também em [17] é possível observar as variações de tensão existentes na linha, em condições de tráfego normal, variando entre os 2kV e os 3.7kV. Visto esta bateria ser baseada na tecnologia de células de combustível de hidrogénio, em que cada célula produz uma tensão de 0,8V e ser necessária a sua associação em série para obter níveis de tensão superiores, e para que esta não fique demasiado pesada (um dos parâmetros de seleção de tecnologias de armazenamento de energia), dimensionar-se-á pelo nível inferior de tensão, os 2kV. Com uma simples equação, determina-se o número de células associadas em série necessária para atingir os valores de tensão pretendidos:

$$n^o_{celulas} = \frac{2000}{0,8} = 2500_{celulas} \quad (3.2)$$

Tendo o número de células associadas em série para obter os níveis de tensão pretendido, para finalizar o dimensionamento da bateria, falta saber os valores de corrente geradas por esta, sendo assim necessário associar blocos de células em paralelo.

Gerando 4MW de potência e 2kV de tensão, rapidamente se calcula o nível médio de corrente necessário:

$$i = \frac{P}{V} = \frac{4 * 10^6}{2 * 10^3} = 2kA \quad (3.3)$$

Como a corrente elétrica é gerada pelo movimento de eletrões, que por sua vez são gerados por reações eletroquímica, a corrente evolui diretamente com a reação, expressando o rácio da transferência de carga.

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (3.4)$$

Onde Q é a carga(C) e t o tempo.

Se em cada reação resultar na transferência de n mols de eletrões, então:

$$i = nF * \frac{dN}{dt} \quad (3.5)$$

Onde $\frac{dN}{dt}$ é o rácio da reação (mol/s) e F a constante de Faraday.

Na utilização da bateria, e para seu dimensionamento, será assumida a utilização de 100% dos combustíveis fornecidos. Assumindo, como demonstrado em [6], 5 sccm (*standard cube centimeter per minute*), a corrente fornecida por uma célula de combustível de hidrogénio, considerando um gás ideal, pode ser calculada:

$$v = \frac{dN}{dt} = \frac{p(dV/dt)}{RT} \quad (3.6)$$

Onde p é a pressão (atm), R constante universal dos gases perfeitos $\frac{L*atm}{mol*K}$ e T a temperatura em K .

$$v = \frac{dN}{dt} = \frac{1 * 0.005}{0.082 * 298.15} = 2.05 * 10^{-4} molH2/min \quad (3.7)$$

Como por cada mol de hidrogénio são transferidos duas mols de eletrões, então $n = 2$. A partir da equação acima, e convertendo minutos para segundos, obtemos:

$$i = nF * \frac{dN}{dt} = 2 * 96485 * 2,05 * 10^{-4} * \frac{1}{60} = 0,659A \quad (3.8)$$

Visto este cálculo ter sido efetuado na condição padrão e esta não se verificar aquando das reações, será assumido o valor de corrente igual a 0,6A por célula.

Sendo necessário 2000A:

$$n^o_{celula} = \frac{2000}{0,6} = 3333, (3)celulas \quad (3.9)$$

Associar-se-ão assim 3334 células de combustível de hidrogénio em paralelo para obter a corrente pretendida.

Tendo especificados os valores de células associadas, quer em série quer em paralelo, para obter os níveis de tensão e corrente pretendidos, respetivamente, é possível dimensionar assim a bateria:

- 2500 células associadas em série, obtendo 2 kV;
- 3334 células associadas em paralelo, obtendo 2 kA;
- Total de 8335000 células, obtendo um total de 4 MW.

3.6 Conclusão

Neste capítulo foi efetuada uma visão geral das tecnologias de armazenamento previamente estudadas, bem como o aprofundamento das duas tecnologias mais prováveis de escolha e a opção por uma delas: Células de combustível de hidrogénio.

Após a sua seleção e devido às suas características, foi executado o dimensionamento da bateria para a sua inserção na ESS.

Capítulo 4

Conversor DC/DC

4.1 Introdução

O conversor DC/DC é o elemento da ESS que transporta a energia proveniente do dispositivo de armazenamento até ao barramento DC da zona de tração. Neste capítulo irá ser demonstrado o seu funcionamento e dimensionamento de forma a que este seja inserido no sistema global, a ESS.

Inserindo-se este conversor no sistema global que é a ESS, este terá que ter a funcionalidade elevador, pois a tensão de entrada será a tensão do dispositivo de armazenamento, 2 kV e a tensão de saída será a do barramento DC da zona de tração, 3 kV.

Visto a bateria a utilizar ser baseada na tecnologia de células de combustível, não haverá necessidade de criar um conversor bidirecional, pois para o funcionamento da mesma irá ser necessária a injeção dos combustíveis, hidrogénio e oxigénio, e como tal esta não precisa de ser carregada mas sim de um reservatório para a alimentação.

4.2 Primeira emulação e resultados

4.2.1 Circuito de potência

Sendo um conversor de elevadas dimensões, 4 MW de potência, irá ser necessário elaborar um conversor entrelaçado, de forma a que cada IGBT suporte as correntes que os atravessarão. Para tal, e sabendo o valor da corrente correspondente ao somatório dos conversores elementares, representada pela corrente fornecida pela bateria, aproximadamente 2 kA, é possível determinar o valor da corrente a passar por cada conversor elementar. Se se optar por um conversor de 2 níveis, a corrente em cada ramo será cerca de 1000 A, se se optar por 3 níveis a corrente em cada ramo será cerca de 670 A. Para uma seleção fiável, olhou-se para os componentes disponíveis no mercado. [18] Mostra os IGBT existentes, agrupados por níveis de tensão. Os transístores deste conversor terão que suportar tensões até 3000 V. No catálogo, na área de IGBT até 3300 V, nível superior mais próximo de 3000 V, é possível observar que suportam correntes até 800 A, inferior aos 1000 A necessários para um conversor de dois níveis, sendo assim necessário um terceiro nível.

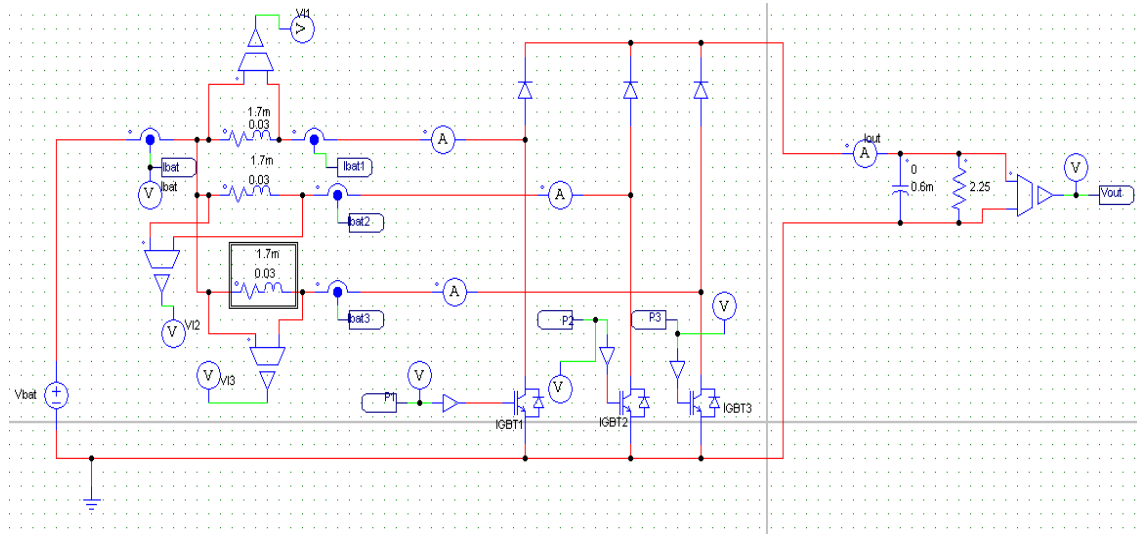


Figura 4.1: Circuito de potência do conversor DC/DC

Na figura 4.1 é possível observar o dispositivo de armazenamento, apresentado como uma fonte de tensão DC, V_{bat} e o barramento de tração representado pelo condensador e resistência do lado direito da figura. É também possível ver os três ramos do conversor entrelaçado, cada um deles definido por uma impedância, um diodo e um IGBT.

Para uma primeira emulação, dimensionou-se o conversor para situações quase perfeitas, em que o dispositivo de armazenamento é representado por uma fonte de tensão DC de valor 2 kV e em que os três conversores elementares são idênticos.

A impedância de cada conversor elementar é constituída por uma bobine e uma resistência em série. [2] refere o valor da indutividade da linha por quilómetro. Este valor é independente da frequência da linha e situa-se entre os 0.75 e os 0.91 mH/km. Sendo o sistema dimensionado para uma distância não superior a 2 quilómetros, optou-se por utilizar o valor de 1.7 mH. A resistência da impedância foi dimensionada de forma a que cada conversor elementar tenha uma perda de tensão de aproximadamente 1% da tensão de entrada, 20 V. Passando uma corrente de 670 A:

$$R = \frac{20}{670} = 30m\Omega \quad (4.1)$$

Sendo a potência do sistema 4 MW e a tensão do barramento DC 3 kV, V_{out} (4.6), inseriu-se uma resistência em paralelo com o condensador de saída para gerar o valor da corrente de saída, I_{out} (4.5), pretendida.

$$I = \frac{4 * 10^6}{3 * 10^3} = 1333,3A \quad (4.2)$$

Pela lei de Ohm, o valor da resistência é de:

$$R = \frac{3000}{1333} = 2.25\Omega \quad (4.3)$$

Sendo um conversor *boost*, a bateria irá alimentar o barramento DC, sendo assim a corrente da bateria positiva. I_{bat} (4.4) irá ser equitativamente dividida pelos três ramos, originando I_{bat1} , I_{bat2} e I_{bat3} (4.3), todas positivas. O valor das tensões nas bobinas são demonstradas por V_{I1} , V_{I2} , V_{I3} (4.2), sendo elas iguais e desfasadas 120° entre si. O valor superior da onda representa o valor de V_{bat} e o inferior $V_{bat}-V_{out}$. O seu *duty cycle* tem valor de:

$$D = 1 - \frac{V_{bat}}{V_{out}} = 1 - \frac{2000}{3000} = 0.(3) \quad (4.4)$$

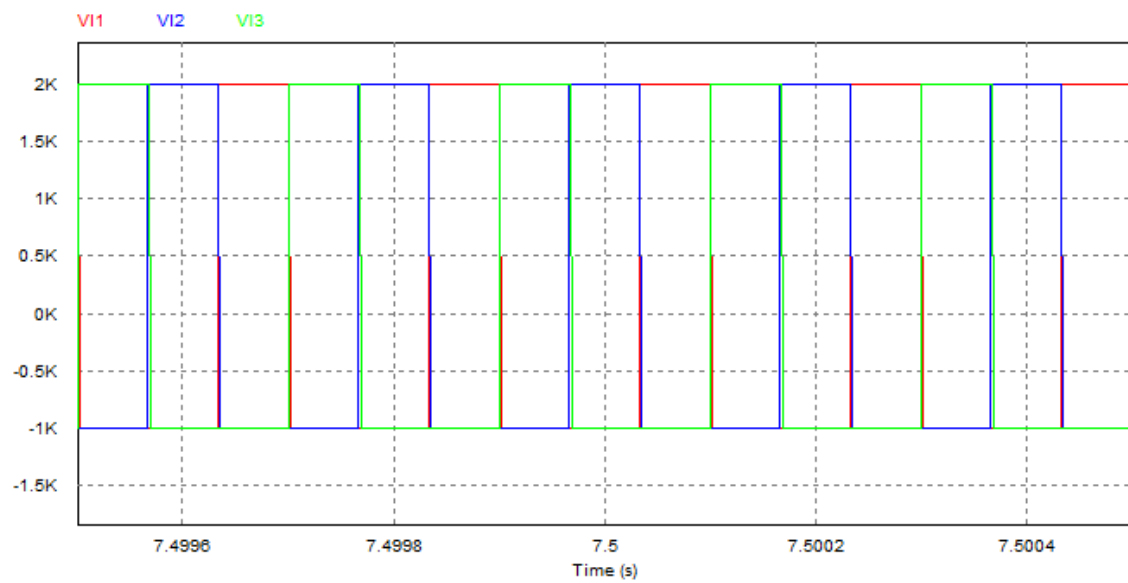


Figura 4.2: Tensão nas bobinas

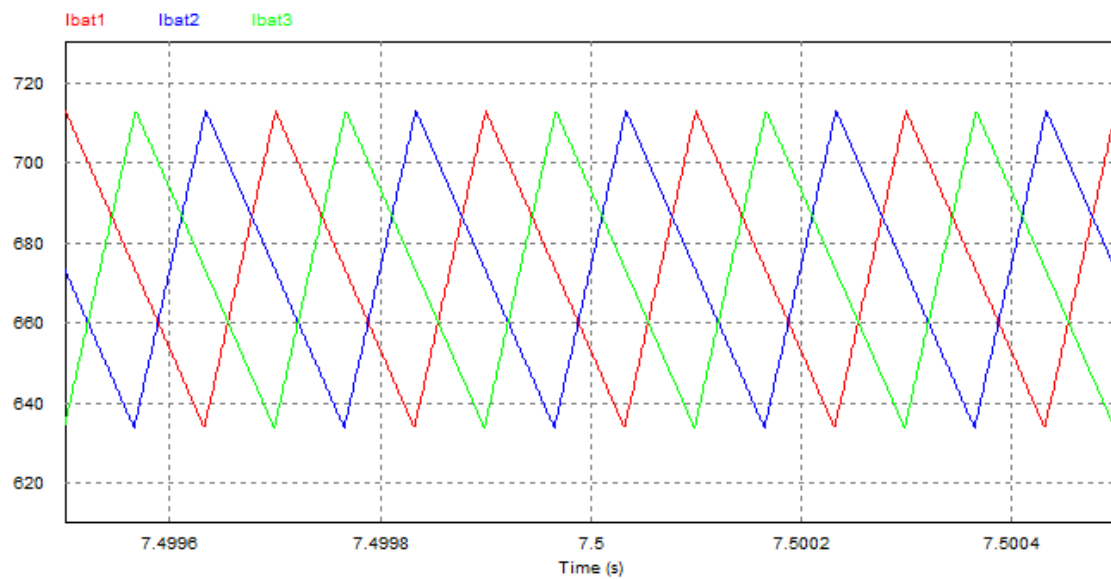


Figura 4.3: Corrente dos três conversores elementares

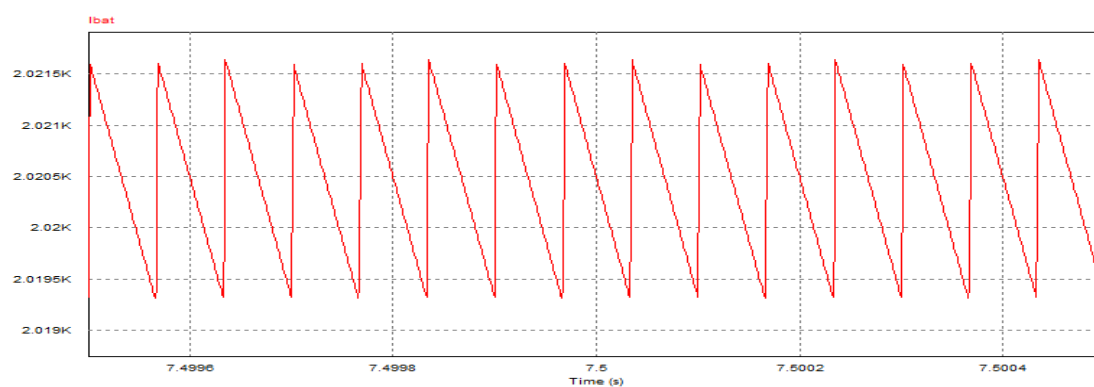


Figura 4.4: Corrente proveniente da bateria

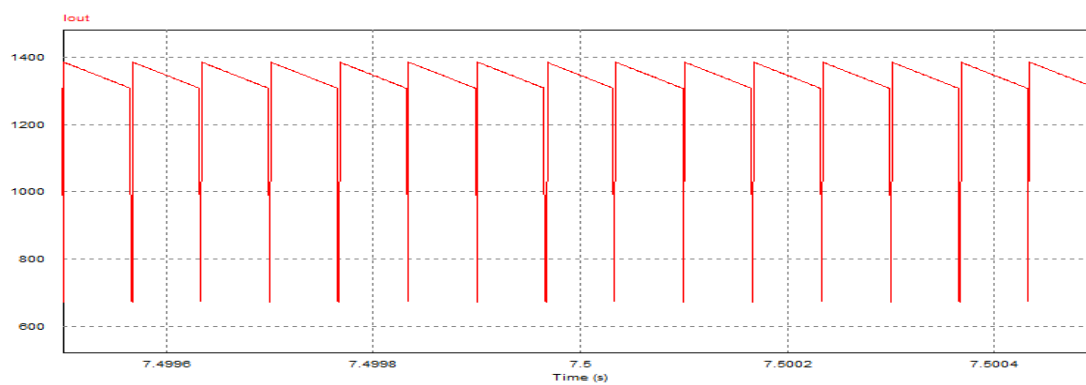


Figura 4.5: Corrente à saída do conversor

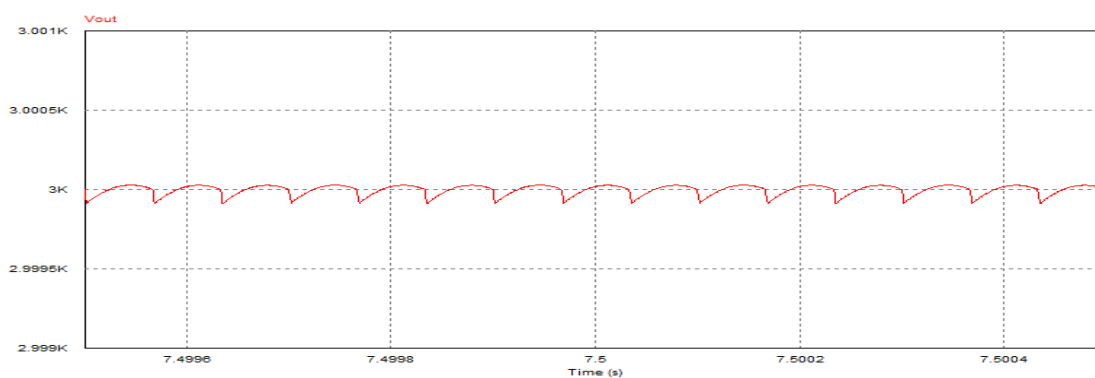


Figura 4.6: Tensão à saída conversor, nível do barramento DC

4.2.2 Circuito de controlo

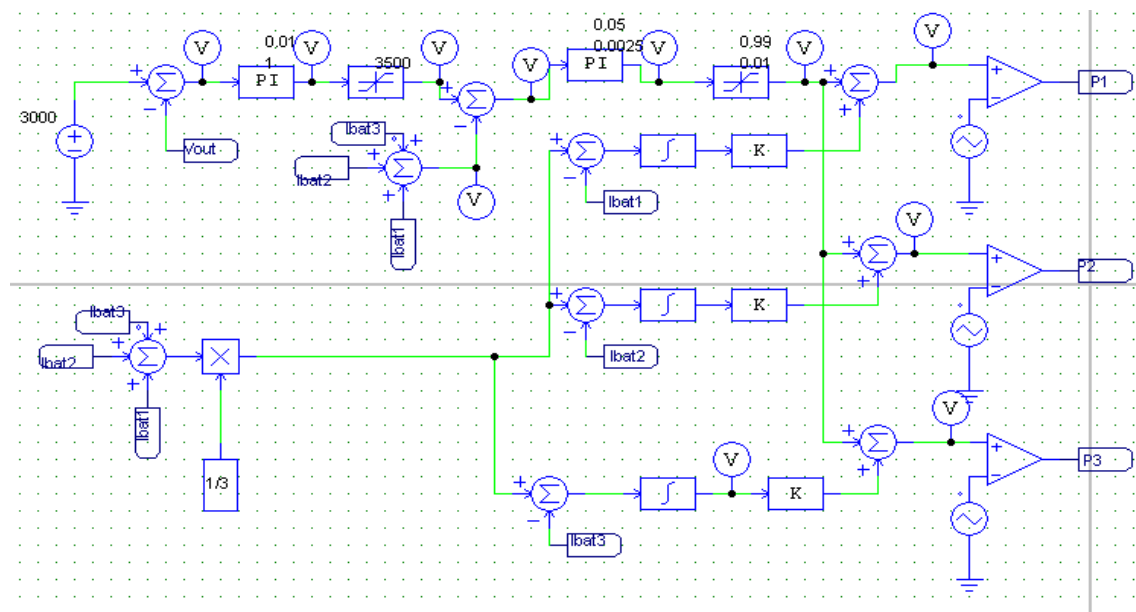


Figura 4.7: Circuito controlador do conversor

Como visto em revisão bibliográfica, o circuito de controlo apresenta dois módulos, módulo de controlo em tensão e de controlo em corrente.

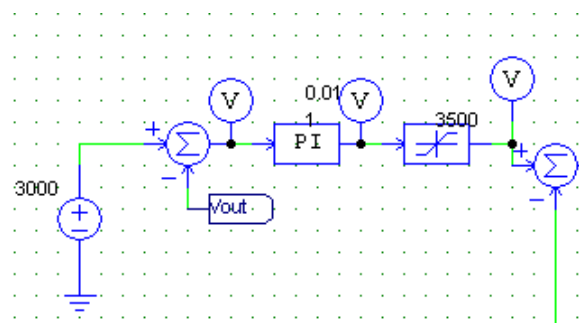


Figura 4.8: Controlador tensão

O controlador em tensão apresentado na figura 4.8 define o valor da tensão de saída, 3000 V e é subtraído o valor real de V_{out} , originando assim ΔV_{out} , que é calculado na equação 4.5. Este valor é transferido para um controlador PI de forma a obter o sinal de comando da corrente da bateria, que será limitado por o valor mais elevado.

$$\Delta V_{out} = \frac{D * V_{out}}{R_{out} * C_{out} * f_s} = \frac{0.333 * 3000}{2.25 * 6 * 10^{-4} * 5000} = \frac{1000}{6.75} = 148.15V \quad (4.5)$$

O controlo de corrente é executado por 2 módulos:

O primeiro módulo, como é possível observar na figura 4.9, tem como entrada o valor de saída do controle em tensão, ao qual será subtraído o valor da corrente que vem da bateria, de

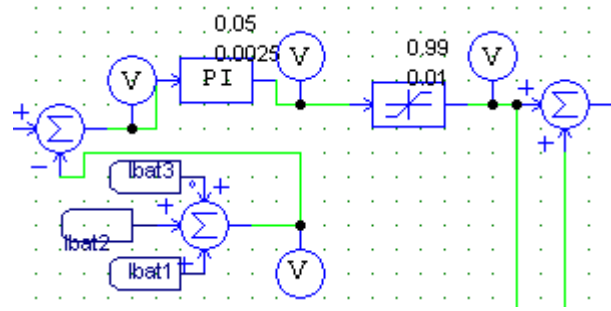


Figura 4.9: Controlador de corrente 1

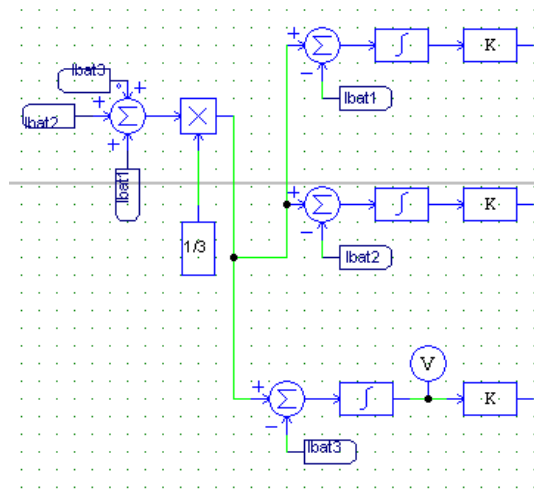
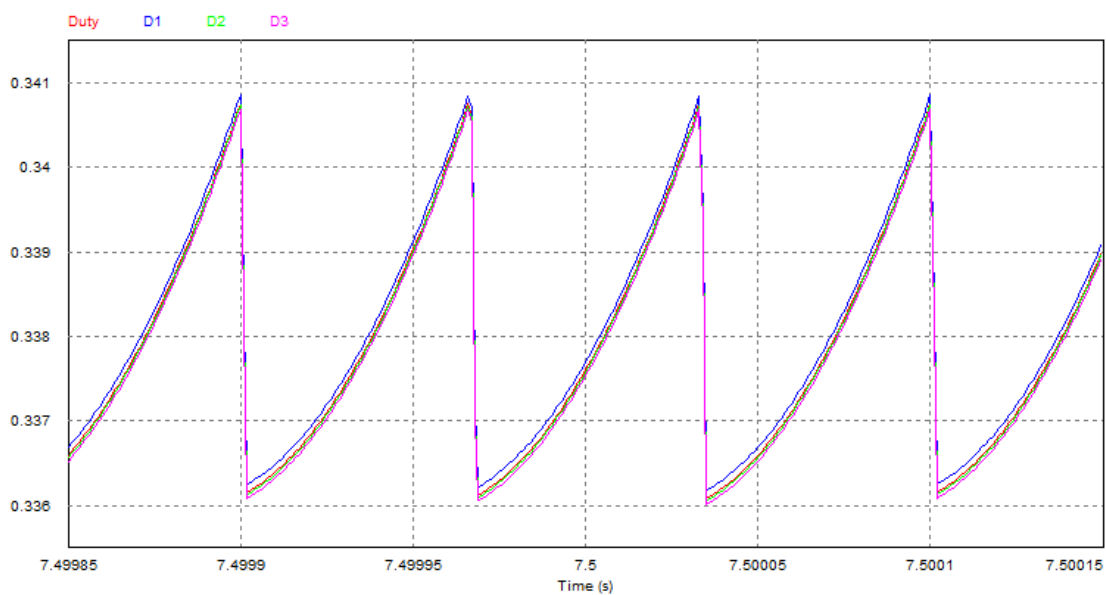


Figura 4.10: Controlador de corrente 2

forma a que a soma das correntes de cada IGBT atinja o valor pretendido. Um controlador PI e um limitador são aplicados a este sinal, de forma a obter o *duty cycle* comum a todos os IGBT e somado à saída do segundo módulo.

O segundo módulo tem a finalidade de igualizar cada corrente à média das somas das correntes, ficando assim todas iguais em valor. Na figura 4.10 é realizada uma média das correntes dos conversores elementares e subtraída cada uma delas, gerando assim o ripple de cada uma das correntes, que é calculado na equação 4.6. Este valor é precedido por um controlador PI de forma a obter a componente que difere cada uma das correntes em relação ao *duty cycle*. Este valor será somado, para cada uma das correntes, com a componente comum do *duty cycle*, gerando D1, D2, D3 (4.11).

$$\Delta I_{bat1} = \frac{D * V_{bat}}{L_{bat} * f_s} = \frac{0.333 * 2000}{1.7 * 10^{-3} * 5000} = \frac{667.67}{8,5} = 78.55A \quad (4.6)$$

Figura 4.11: *Duty Cycle*

Os *duty cycles* serão entrada para os três geradores PWM, composto por uma onda triangular, com frequência de comutação $f_s = 5 \text{ kHz}$ e desfasadas 120° entre si. A saída dos PWM são os sinais de comutação de cada IGBT.

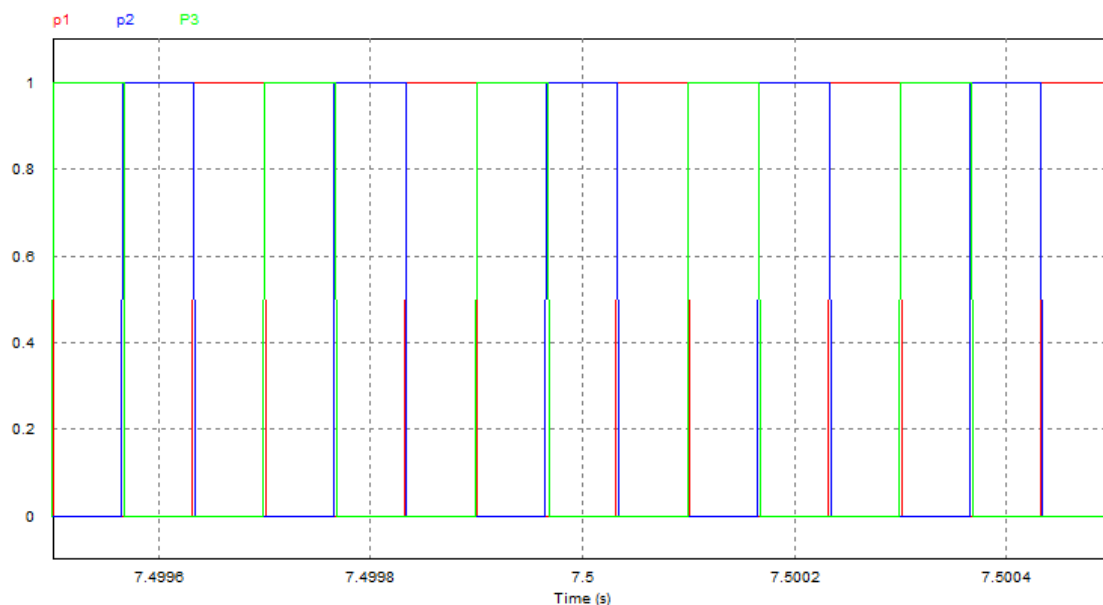


Figura 4.12: Sinais de comutação dos três IGBT's

De forma a obter os parâmetros do controlador deste conversor, utiliza-se o modelo médio em espaço de estados de forma a obter o ganho estático e funções de transferência. Funcionando em modo de condução contínua, o conversor assume dois estados: Quando o transístor está a conduzir (Ton), durante D e quando não conduz (Toff), durante (1-D) [19].

Para T_{on} o circuito é descrito por:

$$L * \frac{di_L}{dt} = -R_L * i_L + V_{in}; \quad (4.7)$$

$$C * \frac{dv_c}{dt} = -\frac{V_c}{R}; \quad (4.8)$$

Para T_{off} :

$$L * \frac{di_L}{dt} = -R_L * i_L + V_{in} - V_c; \quad (4.9)$$

$$C * \frac{dv_c}{dt} = i_L - \frac{V_c}{R}; \quad (4.10)$$

Matricialmente, estas equações são representadas por:

T_{on} :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{C*R} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} * V_{in} \quad (4.11)$$

T_{off} :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{C*R} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} * V_{in} \quad (4.12)$$

Sendo:

$$X = \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix}; \quad (4.13)$$

$$A_{on} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{C*R} \end{bmatrix}; \quad (4.14)$$

$$A_{off} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{C*R} \end{bmatrix}; \quad (4.15)$$

$$B_{on} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4.16)$$

$$B_{off} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4.17)$$

E sabendo que o primeiro conjunto de equações é referente ao período D e o segundo ao período (1-D), é possível descrever o funcionamento do conversor por:

$$\dot{X} = [A_{on} * D + A_{off} * (1 - D)] * X + [B_{on} * D + B_{off} * (1 - D)] * V_{in}; \quad (4.18)$$

Com:

$$A = A_{on} * D + A_{off} * (1 - D); \quad (4.19)$$

$$B = B_{on} * D + B_{off} * (1 - D); \quad (4.20)$$

Logo:

$$\dot{X} = A * X + B + V_{in}; \quad (4.21)$$

Substituindo a equação 4.21 pelas suas matrizes:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & -\frac{(1-D)}{L} \\ \frac{(1-D)}{C} & \frac{-1}{C*R} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} * V_{in} \quad (4.22)$$

De forma a determinar a expressão de controlo de corrente assumir-se-á que, como a variação da corrente na bobina é muito mais rápida que no condensador, $V_c = V_o$ e $\frac{dV_c}{dt} = 0$. Também será considerada a presença de *small signals* variando o valor de D e i_L . Assim:

$$i_L = I_L + \bar{i}_L; \quad (4.23)$$

$$D = D_o + \bar{d} \quad (4.24)$$

Substituindo em 4.22 e considerando $L * \frac{dI_L}{dt} = 0$ e $-R_L * I_L - (2 - D_o)V_o + V_{in} = 0$ obtemos:

$$L * \frac{d\bar{i}_L}{dt} = -R_L * \bar{i}_L + V_o * \bar{d} \quad (4.25)$$

Aplicando a transformada de Laplace a esta equação:

$$[sL + R_L] * \bar{i}_L(s) = V_o * \bar{d}(s); \quad (4.26)$$

$$\frac{\bar{i}_L(s)}{\bar{d}(s)} = \frac{V_o}{sL + R_L} \quad (4.27)$$

De acordo com a equação 4.27, um controlador PI é o controlador apropriado para este conversor. A designação dos seus parâmetros é baseada no *Internal Model Control* [20]:

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{K_i}{s}; \quad (4.28)$$

Com:

$$K_i = \alpha R_L; \quad (4.29)$$

$$K_p = \alpha L; \quad (4.30)$$

Com α (rad/s) sendo a largura de banda da resposta do sistema em malha fechada. α deve ser seleccionado cerca de uma década abaixo da frequência de comutação. Sendo esta 5 kHz, $\alpha = 500$ Hz = 3142 rad/s. Obtendo assim $k_i = 94.3$ e $k_p = 5.3$

4.3 Segunda emulação e resultados

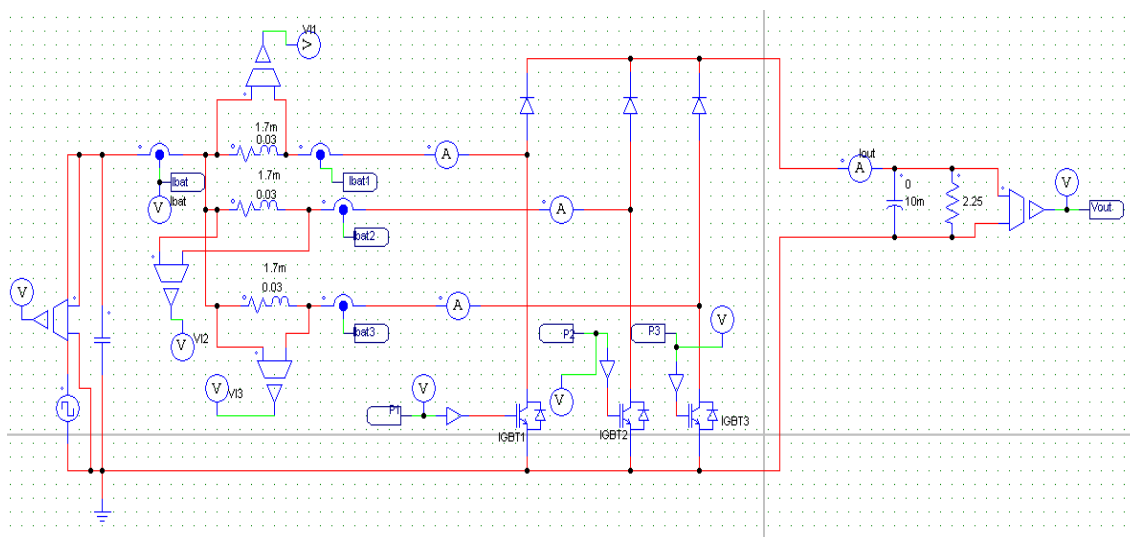


Figura 4.13: Circuito de potência da segunda emulação

Para a segunda emulação, alterou-se a forma como o dispositivo de armazenamento fornece tensão ao conversor. Nesta emulação, a bateria é representada por uma fonte de tensão quadrada, de tensão média 2 kV, pico-a-pico 500 V. Os níveis de tensão são agora fixados em 1750 e 2250 V, que significa um aumento ou um decréscimo de 250 V em relação ao valor médio. Em termos do dispositivo de armazenamento de células de hidrogénio, sendo composto por 2500 células em série, significa que quando a tensão de entrada for 1750, cada célula produzirá menos 0.1 V passando assim para 0.7 V. Quando a tensão for 2250 V, cada célula produzirá mais 0.1 V passando assim para 0.9 V.

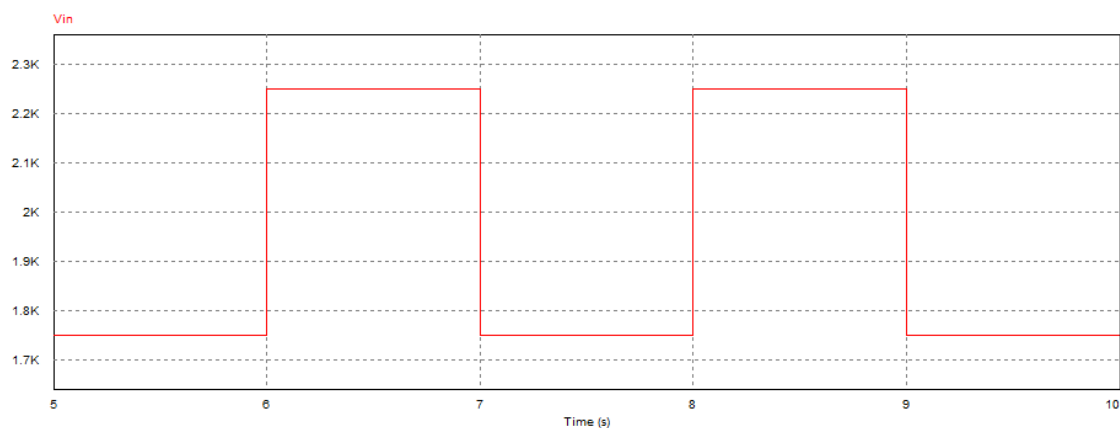


Figura 4.14: Tensão da onda quadrada de entrada

Em relação ao circuito de controlo nada se alterou, pois as funcionalidades de cada bloco continuam a ser necessárias para esta emulação. A alteração da constante de tempo do controlador influenciará a reação do valor da tensão de saída. Aumentando o valor da constante, o *overshoot*

será mais pequeno mas estabilizará mais lentamente. Se por outro lado, se se diminuir o valor da constante, esta tenderá para os 3 kV mais rapidamente mas o seu *overshoot* será maior. Esta variação é possível observar na figura 4.16, onde a primeira imagem tem uma constante de tempo de 0.01s, a segunda dez vezes maior e a terceira dez vezes menor que a original.

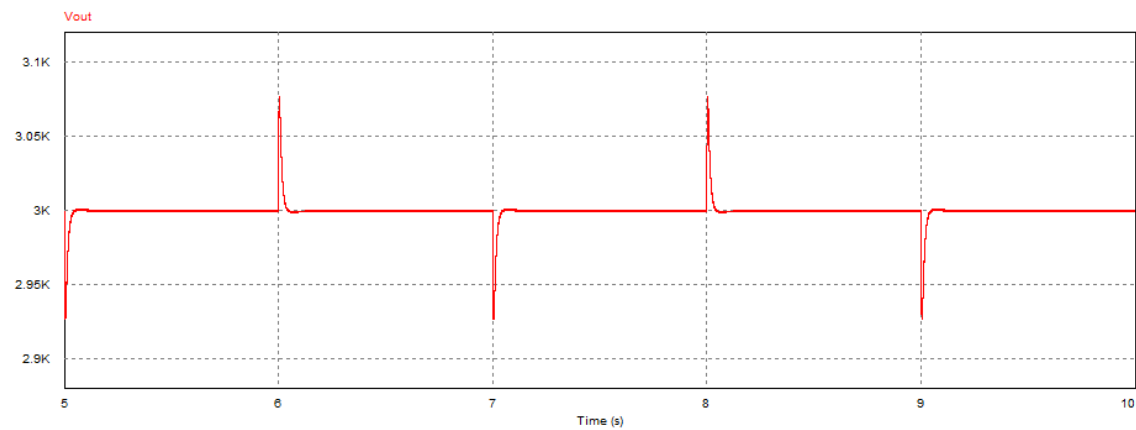


Figura 4.15: Tensão à saída

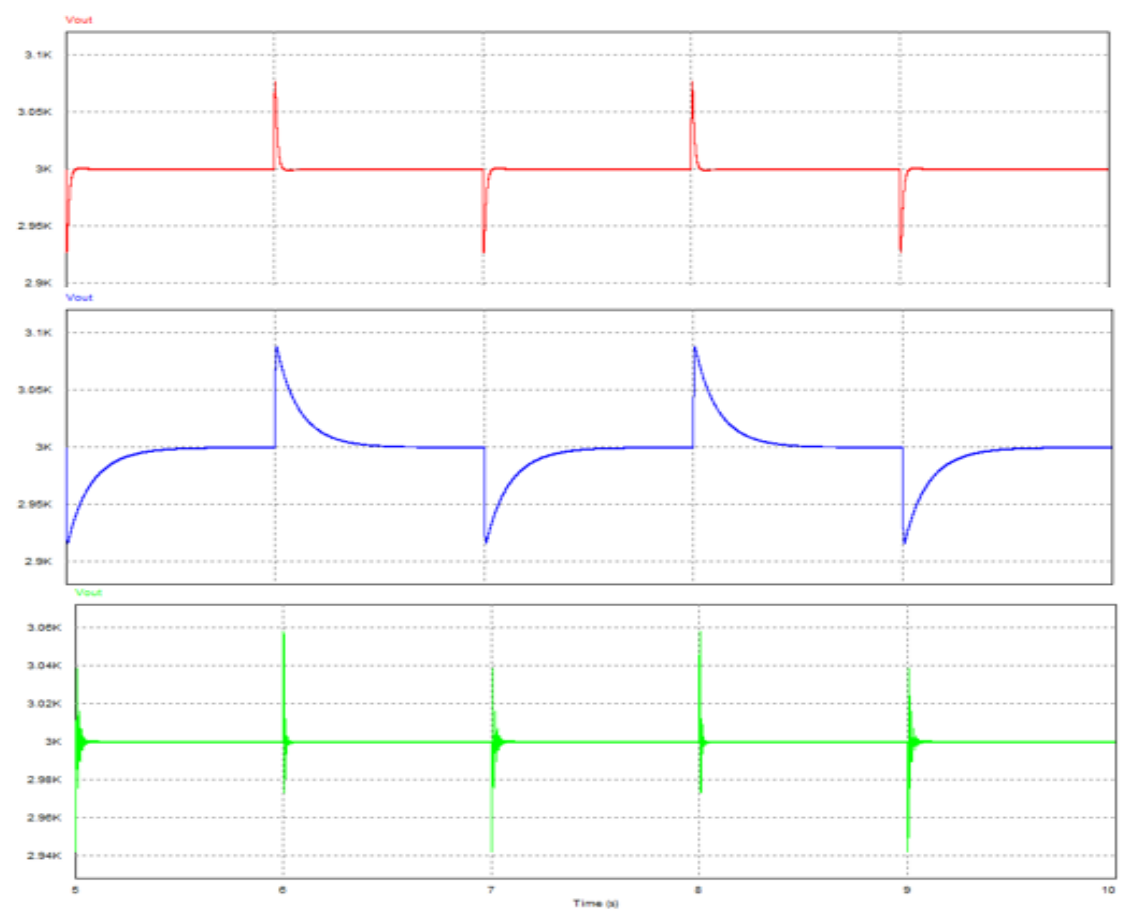


Figura 4.16: Variação da resposta da tensão de saída em relação à constante de tempo de integração

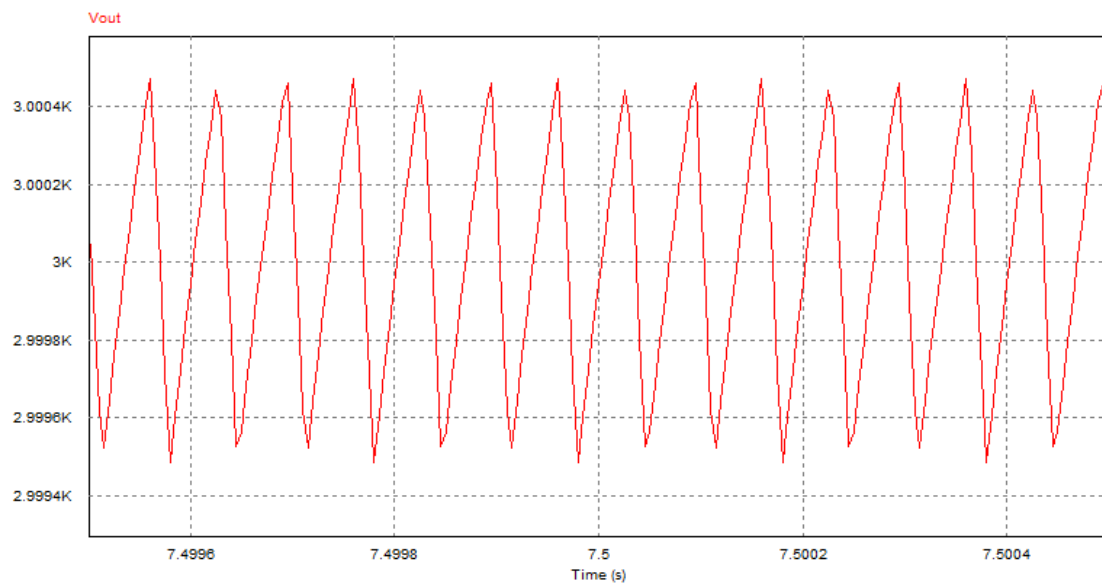


Figura 4.17: Forma de onda da tensão à saída

Em relação ao controlo de corrente, tal como o de tensão, não são necessário alterações pois as funcionalidades do bloco permanecem iguais. Tal como a tensão, a constante de tempo do PI do controlador de tensão influencia também as transições das correntes. Na transição as correntes irão sofrer *overshoot* devido à sua resposta dinâmica até estabilizar novamente no valor médio da soma. De forma a que o sistema permaneça com 4MW de potência, quando o valor da tensão é mais elevado, a soma das correntes é menor e quando a tensão é menor, a soma das correntes aumenta.

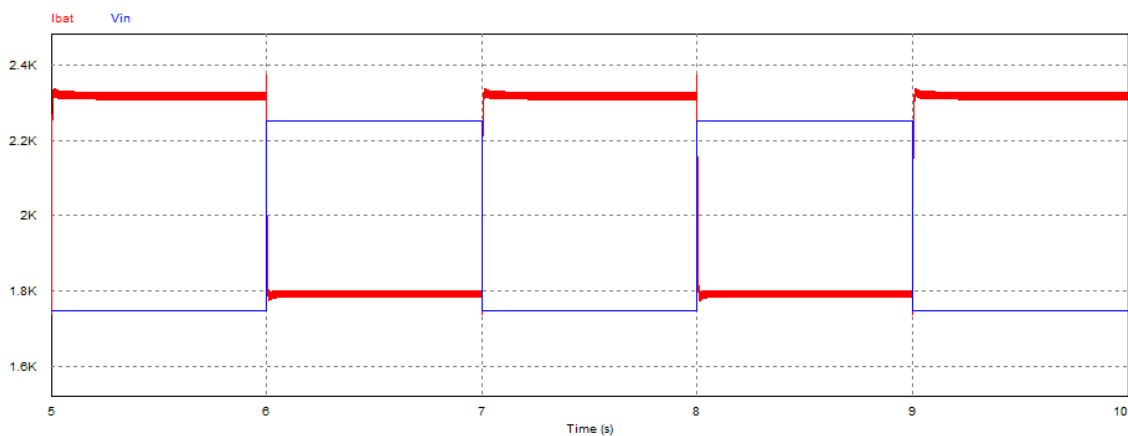


Figura 4.18: Comutação de I_{bat} em resposta à variação de V_{in}

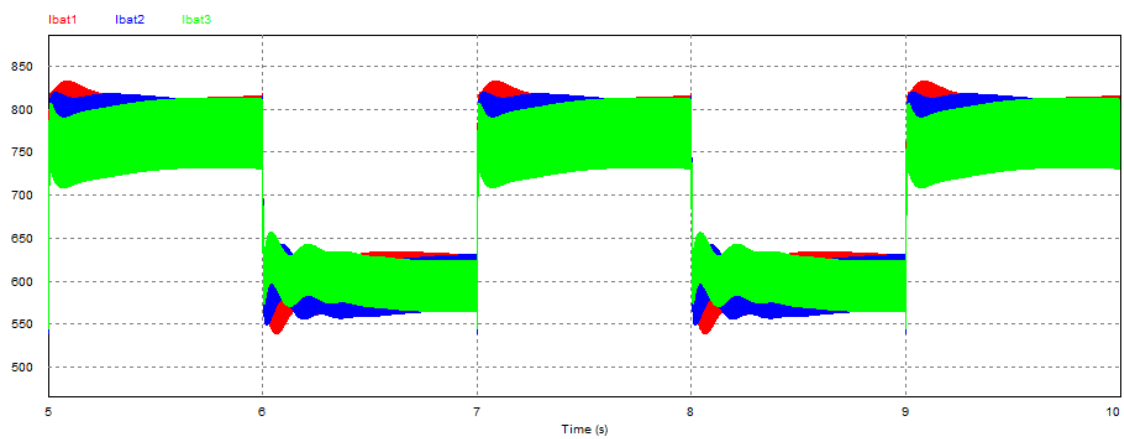
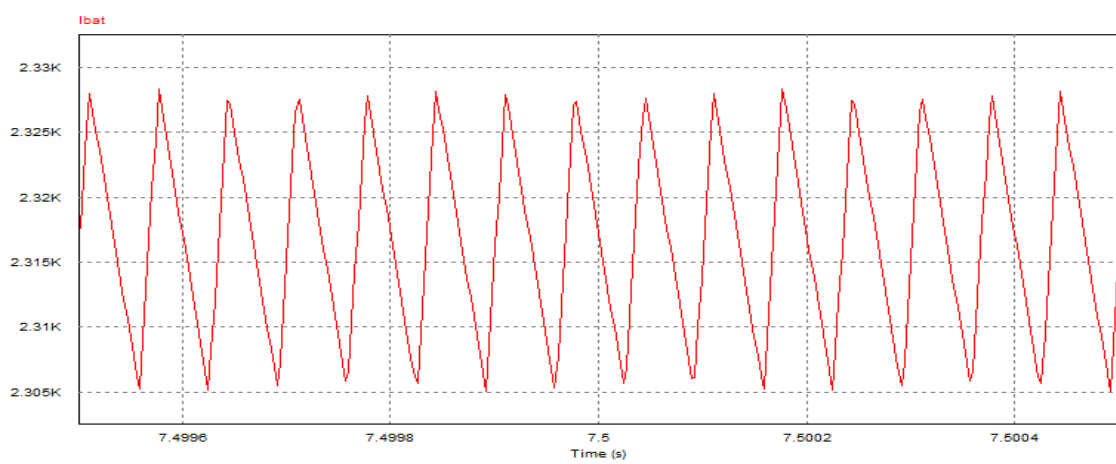
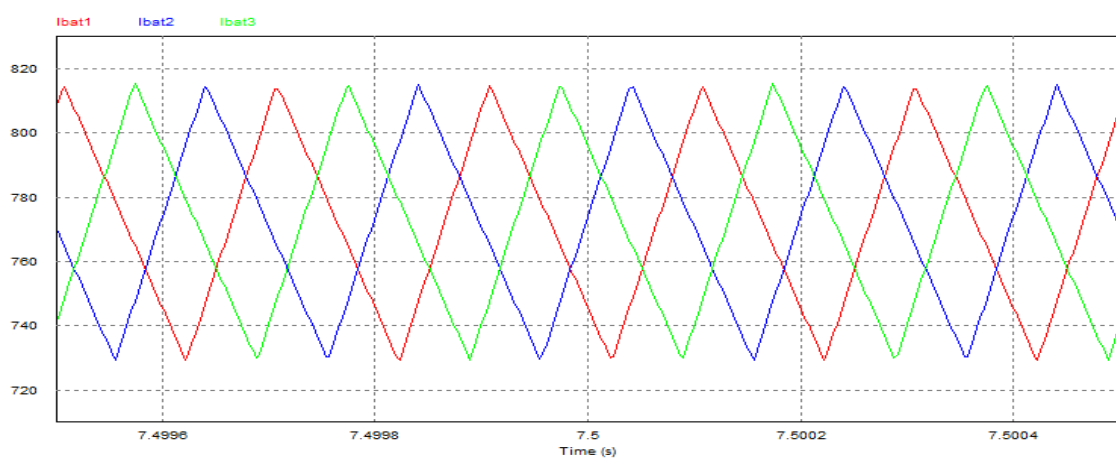
Figura 4.19: Comutação das correntes individuais em resposta à variação de V_{in} Figura 4.20: Forma de onda de I_{bat} 

Figura 4.21: Forma de onda das correntes individuais já estabilizadas

Todos os resultados apresentados e analisados pertencem todos ao domínio dos tempos. Sendo I_{bat} a soma das três correntes que atravessam as bobinas, esta apresenta frequência tripla em relação à frequência de comutação, aos 15 kHz. As correntes individuais, representadas na figura 4.22 por I_{bat2} , apresentam componente à frequência de comutação, 5 kHz. As três correntes apresentam a mesma análise em frequência devido à igualdade de valores das suas bobines. Esta análise só pode ser executada num período em que as correntes já tenham atingido os seus valores estabilizados após a perturbação.

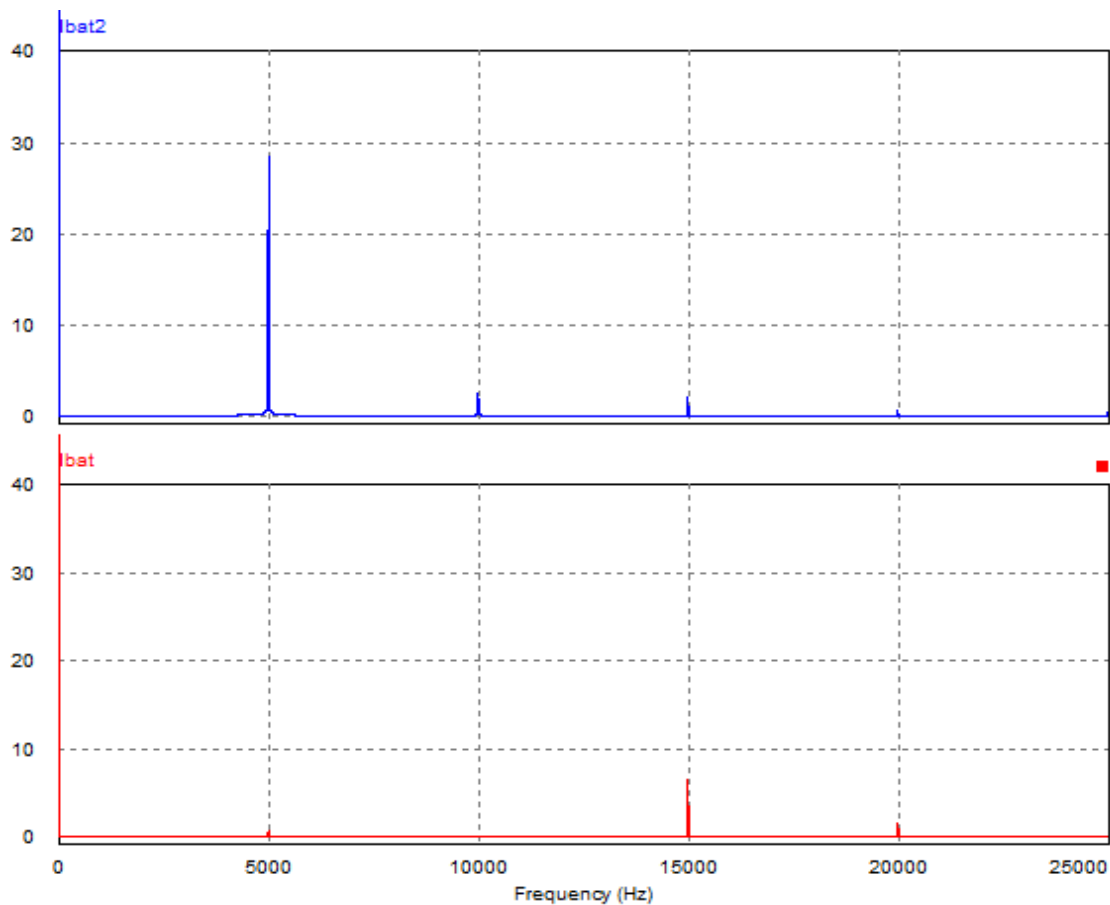


Figura 4.22: Análise em frequência das correntes da bateria e individual

4.4 Terceira emulação e resultados

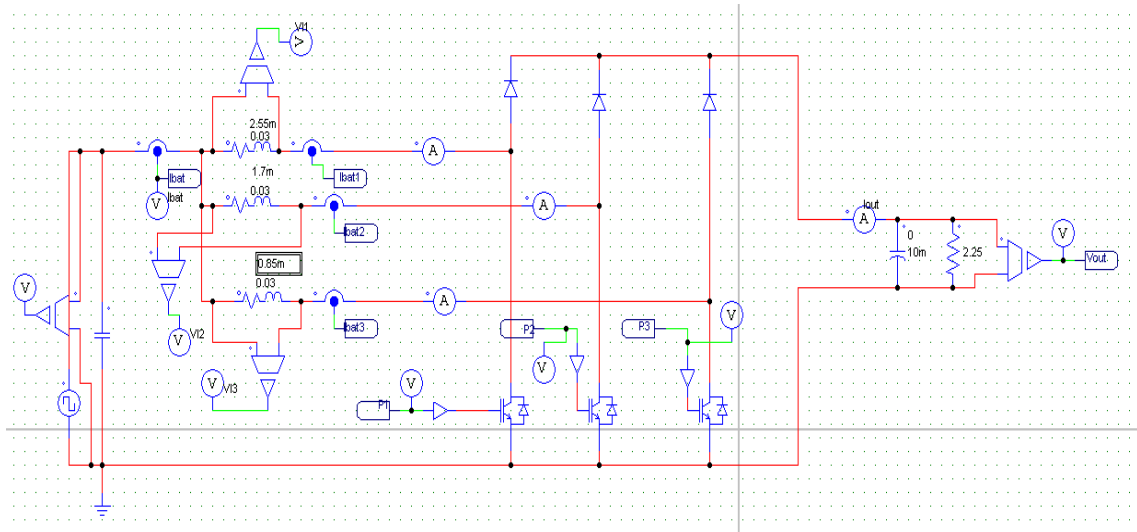


Figura 4.23: Circuito de potência da terceira emulação

A terceira emulação de conversor DC/DC realizada, apenas varia nos valores das bobinas. Esta alteração é efetuada de forma a demonstrar um problema real, que nem todos os componentes num sistema são iguais, mesmo possuindo os mesmos materiais ou fabricantes. Estes valores sofrem uma alteração significativa de forma a realizar uma alteração visível e passível de ser discutida. A alteração destes valores alteram a sua resposta à perturbação. Quando estabilizadas, apresentam também alteração do seu ripple. A bobine referente ao segundo conversor elementar permanece com o mesmo valor de 1.7mH. A bobina do primeiro conversor elementar tem valor de 1.3 vezes, 2.21 mH e a terceira 0.7 vezes, 1.19 mH.

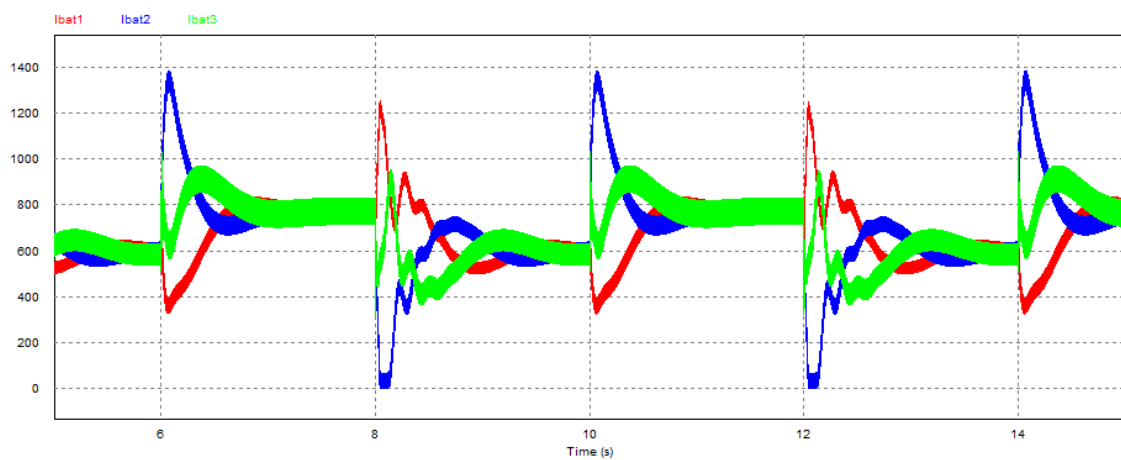


Figura 4.24: Comutação das correntes individuais com diferentes impedâncias

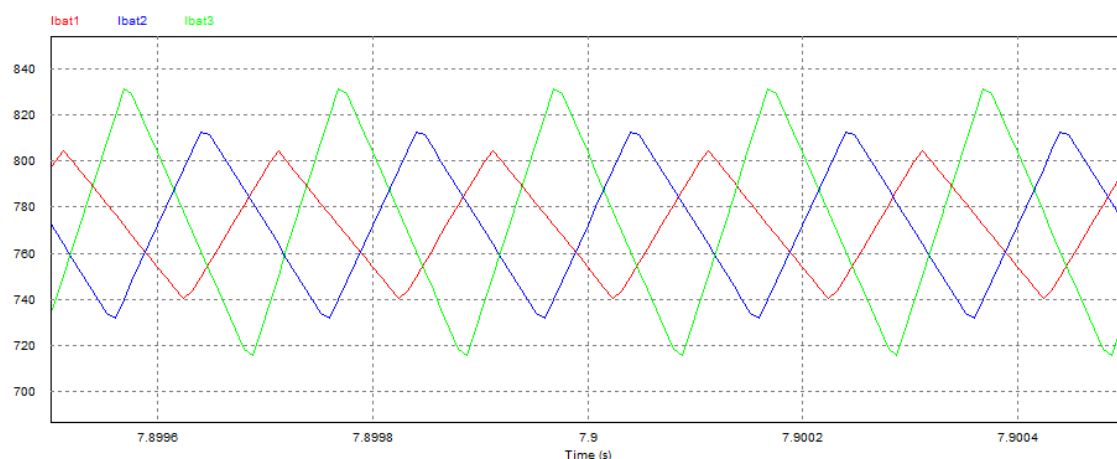


Figura 4.25: Forma de onda das correntes individuais com diferentes impedâncias

Como é possível observar na figura 4.25 e em comparação com a figura 4.21, o ripple das três ondas diferem. Ibat2, como é de esperar, o ripple é igual em ambas as imagens. A onda com ripple maior, de valor 1.4 superior em relação à mesma onda na figura 4.21 é Ibat3. Contrariamente a Ibat3, o ripple de Ibat1 é 0.8 do original devido ao aumento da impedância.

Na análise em frequência é possível visualizar a 5 kHz a diferença dos ganhos das três correntes, imposto pela variação da impedância, com o ganho de Ibat3 a ser o maior e o de Ibat1 o menor. Em análise a Ibat, e contrariamente ao apresentado na figura 4.22 é possível observar na figura 4.26 componente não apenas aos 15 kHz como também aos 5 k e aos 10 kHz

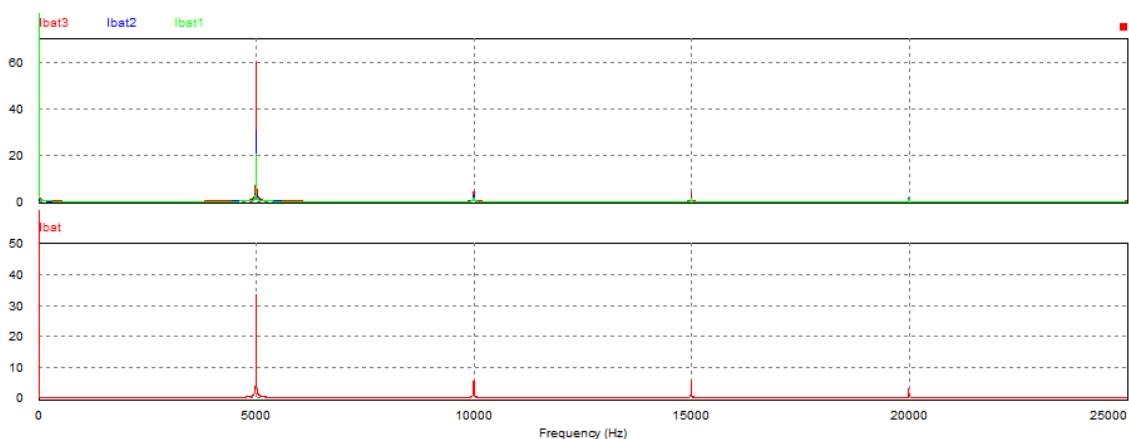


Figura 4.26: Análise em frequência com diferentes valores de impedância

4.5 Perdas de potência nos IGBT's

O conversor não estaria completamente caracterizado sem mencionar o semicondutor utilizado no sistema. As características do IGBT utilizado podem ser consultadas em [21]. O cálculo de perdas de potência demonstra que os elementos utilizados em emulação estão aptos a serem utilizados em implementação física, dando um maior valor à emulação.

As perdas de potência de um IGBT consistem nas suas perdas de condução e nas suas perdas de comutação. Estas perdas também existem no díodo de roda livre associado a cada módulo de IGBT. Existem duas formas diferentes para atingir estes valores:

- Através da emulação, utilizando o *device database editor*;
- Calculadas.

Para ser possível emular o IGBT específico é necessário, primeiro criar um ficheiro do tipo *device*, onde seja possível inserir um novo elemento.

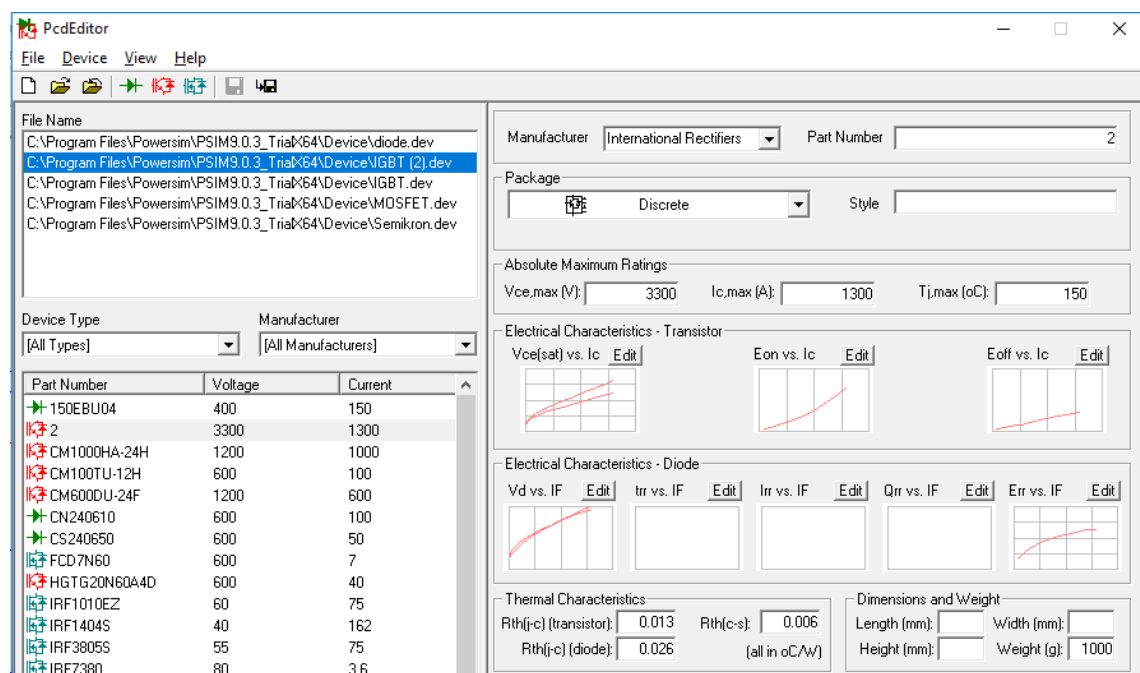


Figura 4.27: Layout de *device database editor*

Na figura 4.27 é possível observar os ficheiros já existentes bem como o tipo de semiconductor com que se está a trabalhar. Na introdução de um semiconductor novo ao sistema é necessário mencionar alguma das suas características.

Para a inserção deste componente no circuito de potência é necessário utilizar o elemento existente no módulo térmico. A sua integração no circuito necessita de um circuito adicional, visto ter um maior número de saída do que o elemento simples.

As variáveis visíveis da figura 4.28 são as saídas do elemento apresentado na figura 4.29. Estas representam os 4 tipos de perdas no módulo IGBT, perdas de condução e comutação do transístor e perdas de condução e comutação do díodo. As resistências representadas são as resistências térmicas quer do transístor, quer do díodo. A fonte de tensão representa a temperatura típica de funcionamento.

Esta emulação foi realizada com o circuito base, o circuito da primeira emulação.

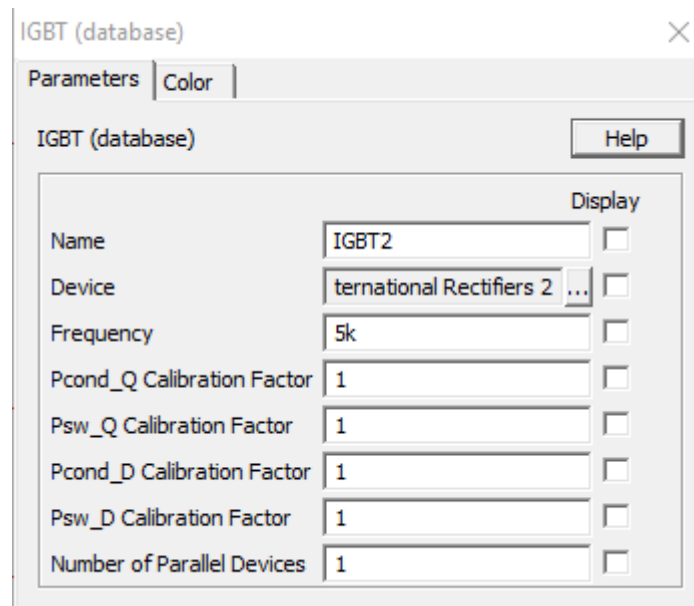


Figura 4.28: Variáveis do IGBT

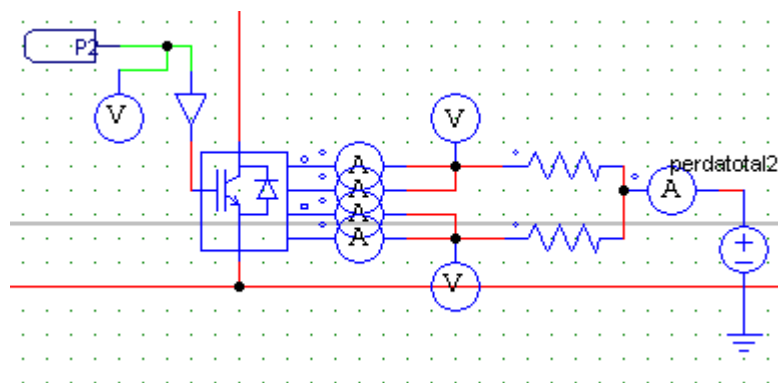


Figura 4.29: Circuito adicional do IGBT

Na figura 4.30 observa-se as perdas totais de cada IGBT, com valores aproximados aos 18 kW, e em cada diodo cerca de 8900 W. Num sistema de 4 MW, as perdas totais dos seis semicondutores perfazem um total de 80 kW, representando 2% do sistema.

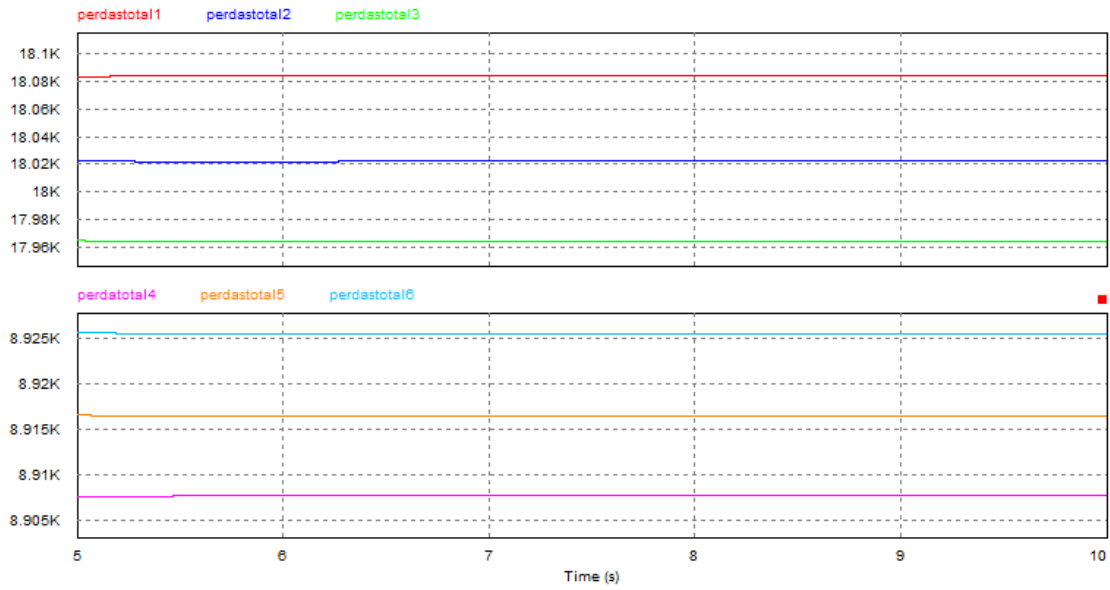


Figura 4.30: Perdas totais nos semicondutores

Este valor também pode ser calculado, para tal vai ser calculado as 4 componentes individuais.

As componentes de comutação apenas dependem da energia dissipada na variação de estado e da frequência de comutação. Os valores da energia são extraídos dos gráficos presentes na *datasheet*, correspondente com o valor da corrente presente na simulação, 675 A.

$$P_{sT} = (E_{onT} + E_{offT}) * f_s = (1.19 * 10^{-6} + 0.87 * 10^{-6}) * 5 * 10^3 = 10300W \quad (4.31)$$

$$P_{sD} = E_{recD} * f_s = 0.95 * 10^{-6} * 5 * 10^3 = 4750W \quad (4.32)$$

As perdas de condução instantâneas dependem dos valores de V_{ce0} e V_{F0} , transistor e diodo respetivamente. Estes valores podem ser extraídos dos gráficos correspondes na *datasheet*, prolongando a reta onde o comportamento é linear até bater no eixo das abcissas. Depende também das resistências r_C e r_F , também extraídas do gráfico. São ainda dependentes de I_C e I_F .

Para o transistor tem-se:

$$r_C = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{6.5 - 3}{1600 - 400} = 2.917m\Omega \quad (4.33)$$

$$P_{cT} = V_{CE0} * I_C + r_C * I_C^2 = 1.83 * 675 + 2.917 * 10^{-3} * 675^2 = 2564W \quad (4.34)$$

Por outro lado, para o diodo:

$$r_F = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F} = \frac{4 - 2}{1600 - 400} = 1.667m\Omega \quad (4.35)$$

$$P_{cD} = V_{F0} * I_F + r_F * I_F^2 = 1.33 * 675 + 1.667 * 10^{-3} * 675^2 = 1657W \quad (4.36)$$

Globalmente, obtém-se:

$$P_{total} = P_{sT} + P_{sD} + P_{cT} + P_{cD} = 10300 + 4750 + 2564 + 1657 = 19271W \quad (4.37)$$

De notar a proximidade dos resultados em ambas as abordagens. O valor mais fidedigno será o valor emulado, pelo facto de ser mais preciso, pois é baseado nas curvas enquanto que as equações baseiam-se em aproximações e arredondamentos dos cálculos intermédios.

4.6 Conclusão

Neste capítulo foi realizada a emulação de três conversores DC/DC aptos para se inserirem no sistema da ESS.

Estas emulações divergem na forma como a potência é inserida no conversor e toda a resposta dinâmica da parte do mesmo. A primeira emulação demonstra uma situação em que a bateria se comporta como uma fonte de tensão DC enquanto na segunda a bateria apresenta variações na tensão de entrada. É possível observar-se a resposta das componentes quando inserida a perturbação e a estabilização dos mesmo para os valores pretendidos de forma a garantir os 4 MW e 3 kV à entrada do barramento DC da zona de tração.

A primeira é referente a um sistema praticamente perfeito, onde a bateria é representada como uma fonte de tensão DC e o conversor perfeitamente equilibrado.

Na segunda e terceira emulações foram inseridas perturbações no sistema passíveis de acontecerem em testes reais. Na segunda emulação alterou-se a forma como a potência é injetada no conversor, apresentando variações na tensão de entrada. Na terceira emulação, os valores das impedâncias de cada conversor elementar foram alterados.

É possível observar-se a resposta das componentes quando inseridas as perturbações e a estabilização dos valores, de forma a obter no barramento DC da zona de tração os 4 MW e 3 kV.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

O objetivo principal desta dissertação era o desenvolvimento de um sistema de tração baseado em baterias capaz de ser inserido num comboio e desenvolver um curto caminho. Para que tal fosse atingido foi necessário, primeiramente, o estudo do que atualmente já existe e, posteriormente, o desenvolvimento de um sistema.

O desenvolvimento de ESS suscitou o interesse da Europa e a sua existência tem particular interesse para o programa S2R. A nível do seu IP1, este sistema cumpre os pontos de diminuição de gases, barulho e poluição. Sendo o dispositivo de bateria baseado em células de combustível de hidrogénio, estas tornam a sua locomoção muito mais limpa e ecológica. O facto de as células de combustível não necessitarem de ser recarregadas mas sim alimentadas pelos combustíveis fará com que esta dissertação não se insira no IP3, onde o estudo da regeneração de energia teria maior interesse. Esta dissertação cumpre em especial os critérios do IP5: Aumentar os serviços prestados pelos transportes ferroviários, chegando onde até agora não conseguem devido à falta de alimentação.

Os principais focos de trabalho desta dissertação foram o dispositivo de armazenamento de energia e o conversor DC/DC. Para a criação do dispositivo de armazenamento foi necessário um estudo prévio das tecnologias de armazenamento existentes e suas características. Todas elas apresentam vantagens e desvantagens em relação umas às outras, por isso foi necessário atribuir pesos às diversas componentes. A escolha pendeu para a tecnologia de células de combustível de hidrogénio devido aos seus altos níveis de densidade energética e de potência, revelando-se assim uma tecnologia bastante compacta, tornando-a mais fácil de aplicar num sistema que terá que estar a bordo de um comboio. A bateria, do exterior poderá ser vista por uma fonte de tensão DC comum, mas nesta dissertação foi aprofundada, vendo a característica de uma célula individual e realizado um dimensionamento a ser capaz de alimentar um comboio durante breves minutos.

O conversor DC/DC fará a ligação entre o dispositivo de armazenamento e o barramento DC da zona de tração. Visto a bateria possuir tensão inferior ao barramento DC e não necessitar de ser carregada, foi realizado um conversor *boost*. De forma a reduzir o seu tamanho, entrelaçaram-se

três conversores elementares. Foram realizadas três emulações diferentes, adicionando perturbações às emulações anteriores. Analisaram-se os resultados obtidos e a resposta dinâmica dos elementos até a sua estabilização. No final, o conversor realiza a função esperada, elevando a tensão de entrada de 2 kV para os 3 kV do barramento DC.

5.2 Trabalho Futuro

Apesar dos objetivos desta dissertação serem atingidos, há sempre maneira de inovar e melhorar o sistema global. Assim, propões-se algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalho futuro:

- A projeção de um dispositivo de armazenamento baseado em duas tecnologias diferentes. Uma continuaria a ser célula de combustível, e outra poderia ser uma bateria como as de chumbo ou íões lítio, de forma a suavizar o movimento quando são inseridos picos de corrente, como no arranque. Com um dispositivo de armazenamento baseado numa tecnologia como baterias de chumbo e íões lítio, seria agora possível o seu carregamento através da regeneração de energia na travagem do comboio. Esta alteração implicaria na alteração da topologia do conversor DC/DC, passando, obrigatoriamente, a ser um conversor bidirecional. Quando estivesse a descarregar a bateria, o conversor comportar-se-ia tal como o proposto nesta dissertação, um conversor *boost*. No caso de carregamento da bateria, o conversor teria que ser um conversor *buck*.
- Implementação de controlador digital no conversor DC/DC, como *Sliding Mode Control*.

Referências

- [1] Sustainable and intelligent management of energy for smarter railway systems in europe: an integrated optimization approach. www.merlin-rail.eu/wp-content/uploads/2012/12/MRL-WP1-D-ANS-013-06-D1_1-Railway_network_key_elements_and_main_sub-systems_specification.pdf. Accessed: 2017-04-28.
- [2] Andreas Steimel. *Electric traction-motive power and energy supply: basics and practical experience*. Oldenbourg Industrieverlag, 2008.
- [3] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, e Yulong Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3):291–312, 2009.
- [4] Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, e Venizelos Efthimiou. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6):1513–1522, 2009.
- [5] Huang-Jen Chiu e Li-Wei Lin. A bidirectional dc-dc converter for fuel cell electric vehicle driving system. *IEEE Trans. Power Electron*, 21(4):950–958, 2006.
- [6] Ryan O’hayre, Suk-Won Cha, Fritz B Prinz, e Whitney Colella. *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons, 2016.
- [7] Frank Becker e André Dämmig. Catenary free operation of light rail vehicles—topology and operational concept. Em *Power Electronics and Applications (EPE’16 ECCE Europe)*, 2016 18th European Conference on, páginas 1–10. IEEE, 2016.
- [8] Arturo González-Gil, Roberto Palacin, e Paul Batty. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy conversion and management*, 75:374–388, 2013.
- [9] Decision on the adoption of the shift2rail masterplan. <http://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/rail/doc/2015-03-31-decisionn4-2015-adoption-s2r-masterplan.pdf>. Accessed: 2016-10-28.
- [10] Frank Becker e André Dämmig. Catenary free operation of light rail vehicles—topology and operational concept. Em *Power Electronics and Applications (EPE’16 ECCE Europe)*, 2016 18th European Conference on, páginas 1–10. IEEE, 2016.
- [11] Raymond Chang. *Química geral*. AMGH Editora, 2009.

- [12] Z Li, S Hoshina, N Satake, e M Nogi. Dc/dc converter development for battery energy storage supporting railway dc feeder system. Em *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, 2015 9th International Conference on, páginas 1655–1660. IEEE, 2015.
- [13] Brahim Lagssiyer, Smail Zouggar, e Mohamed El Hafyani. Modeling and maximizing extracted pv power by converter boost interlaced. Em *Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2015 3rd International, páginas 1–6. IEEE, 2015.
- [14] Muhamad Farhan Bin Umar Baki. *Modelling and control of DC to DC converter (buck)*. Tese de doutoramento, University Malaysia Pahang, 2008.
- [15] Michael Steiner e Harry Reinold. Medium frequency topology in railway applications. Em *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, páginas 1–10. IEEE, 2007.
- [16] Faizur Rahman, Shafiqur Rehman, e Mohammed Arif Abdul-Majeed. Overview of energy storage systems for storing electricity from renewable energy sources in saudi arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1):274–283, 2012.
- [17] Vito Calderaro, Vincenzo Galdi, Giuseppe Graber, Antonio Piccolo, Alfonso Capasso, Regina Lamedica, e Alessandro Ruvio. Energy management of auxiliary battery substation supporting high-speed train on 3 kv dc systems. Em *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2015 International Conference on, páginas 1224–1229. IEEE, 2015.
- [18] Infineon shortform catalog 2017 power semiconductors for industrial and consumer applications. www.infineon.com/dgdl/Infineon-Shortform+Catalog-PC-v03_00-EN.pdf?fileId=db3a30431a47d73d011a529661267822. Accessed: 2017-05-30.
- [19] Modelagem de conversores cc-cc empregando modelo médio em espaço de estados. ivobarbi.com/novo/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=159. Accessed: 2017-06-22.
- [20] Sigurd Skogestad. Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning. *Journal of process control*, 13(4):291–309, 2003.
- [21] Datasheet fz800r33kf2c. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FZ800R33KF2C-DS-v02_01-en_de.pdf?fileId=db3a304412b407950112b4313fbb53e7. Accessed: 2017-06-18.